studium Integrale

journal

Ausbruch des Mt. St. Helens

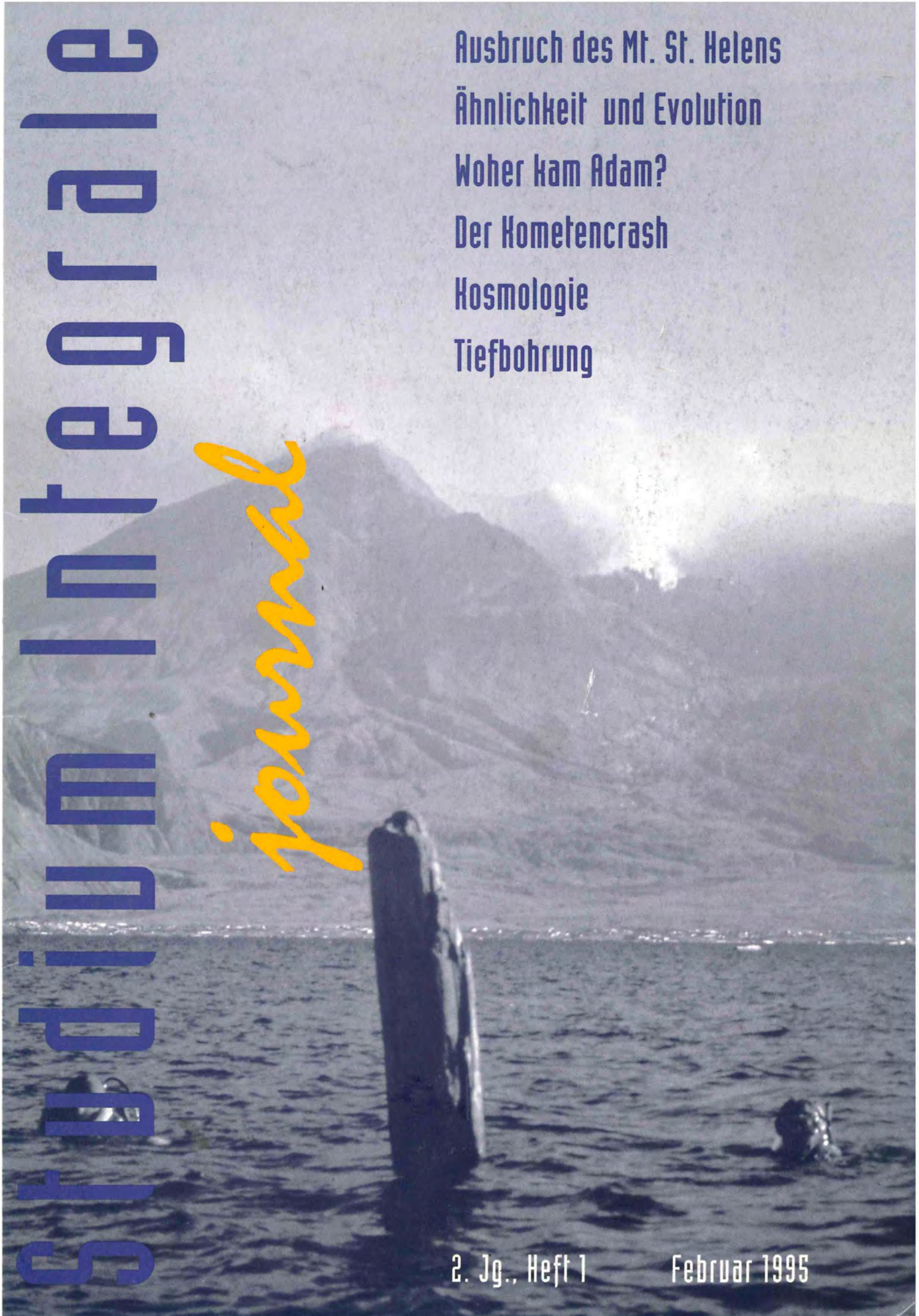
Ähnlichkeit und Evolution

Woher kam Adam?

Der Kometencrash

Kosmologie

Tiefbohrung



2. Jg., Heft 1 Februar 1995

Ein grundlegendes Werk zur Grundtypenbiologie

Siegfried Scherer (Hg.)

Typen des Lebens

Pascal Verlag Berlin, 1993, 257 S., 88 Abb.,
zahlreiche Tab., Format 16,5 x 24;
ISBN 3-927390-12-7, Best.-Nr. 899.812,
DM 34,95/sfr 36,50/ÖS 273,–

Über die Abgrenzung von taxonomischen Kategorien wie Art, Gattung und Familie konnte bis heute keine Einigkeit erzielt werden.
Die Autoren von Typen des Lebens machen auf die bisher wenig beachtete Möglichkeit aufmerksam, Verwandtschaftskreise experimentell überprüfbar durch zwischenartliche Kreuzungen zu charakterisieren.
Die darauf aufbauende, genetisch begründete Grundtyp-Kategorie ist der Spezies-Kategorie übergeordnet und liegt bei den bisher untersuchten Organismen aus dem Tier- und Pflanzenreich zwischen Gattung und Familie. Grundtypen repräsentieren klar voneinander abgegrenzte Gruppen.
Artbegriffen liegt gewöhnlich die Annahme zugrunde, daß Artbildung mit Höherentwicklung korreliert sei. Im Gegensatz dazu werden die Merkmalsverteilungen innerhalb der Artenfächer einzelner Grundtypen im Rahmen der Hypothese genetisch polyvalenter Stammformen gedeutet, aus denen durch Artbildungsprozesse genetisch weniger flexible Nachkommen entstanden sind.

Aus dem Inhalt:
Basic types of life • Prozesse der Artbildung • Ideological roots of the species concept • Funariaceen (Bryophyta, Musci) • Streifenfarngewächse (Filicatae, Aspleniaceae) • Weizenartige (Poaceae, Tribus Triticeae) • Die Gattungen Geum (Nelkenwurz), Coluria und Waldsteinia (Rosaceae, Tribus Geeae) • Kernobstgewächse (Rosaceae, Unterfamilie Maloideae) • Entenartige (Anatidae, Anseriformes) • Hühnervögel (Galliformes) • Greifvögel (Falconiformes) • Carduelide Finken und Prachtfinken • Hundeartige (Canidae) • Pferde (Equidae) • Meerkatzenartige (Primates, Cercopithecoidea)

Erhältlich im Buchhandel oder direkt bei:
Studiengemeinschaft Wort & Wissen, Sommerhalde 10, 72270 Baiersbronn
Telefon (0 74 42) 44 72, Fax (0 74 42) 5 05 23

Dipl.-Biol. Klaus Neuhaus
Rotkreuzstraße 39
85354 Freising
Tel. 08161/96045

IMPRESSUM

Herausgeber:
Studiengemeinschaft Wort und Wissen e.V.,
Sommerhalde 10, D–72270 Baiersbronn,
Tel. (0 74 42) 44 72, Fax (0 74 42) 5 05 23

Redaktion:
Dr. Harald Binder, Konstanz
Dr. Thomas Fritzsche, Göttingen
Dr. Reinhard Junker, Baiersbronn
Dr. Volker Kessler, Vierkirchen

Korrespondenzadresse:
Dr. Reinhard Junker, Sommerhalde 10,
D–72270 Baiersbronn

Graphik/Design:
Regine Tholen AGD, Hüttenberg

Druck und Bindung:
Weihert-Druck Darmstadt

Erscheinungsweise und Bezugsbedingungen:
Die Zeitschrift erscheint zweimal jährlich. Jahresbezugspreis DM 29,50; für Studenten DM 19,50; Preise **inkl.** Versandkosten und MwSt. Auslandspreise auf Anfrage. Einzelhefte: DM 15,– (zzgl. Versandkosten). **Bestellungen** richten Sie an den Herausgeber. Die Abonnementsgebühren werden durch Lastschriftverfahren bezahlt. Das Abonnement kann mit einer Frist von drei Monaten zum Jahresende gekündigt werden. Die Kündigung muß schriftlich erfolgen.

Alle Rechte vorbehalten.

Die Verantwortung für den Inhalt tragen die jeweiligen Autoren. Der Herausgeber und die Redaktion identifizieren sich nicht zwangsläufig mit allen Details der Darlegungen.

Titelbild: Taucher im Spirit Lake an einem aufrecht abgelagerten Baumstamm. Dieser Baumstamm wurde fest in den Schichten am Boden des Sees eingebettet. Im Hintergrund der Krater des Mount St. Helens. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung des Institute for Creation Research, El Cayon.

STUDIUM INTEGRALE journal

2. Jahrgang/Heft 1 – Februar 1995

INHALT

Th. Fritzsche — Die Ausbrüche des Mt. St. Helens – und die Folgen — 3
A. Weller — Mikroevolution im Zugverhalten der Mönchsgrasmücke — 12
K. Neuhaus — Die Familie der Bromeliaceen – ein oder mehrere Grundtypen? — 15
R. Junker — Der Ähnlichkeitsbeweis der Evolution – ein Zirkelschluß? — 19
S. Hartwig-Scherer — Adam kam aus ... – Neues zur Ausbreitungsgeschichte des Menschen — 26
H. W. Beck — Hinweise zur kontroversen Diskussionslage in der heutigen Kosmologie — 29

Kurzbeiträge

N. Pailer — Weltraumtelegramm: Der Kometencrash – ULYSSES: No solar pole – Pulsar mit Planeten — 33
Th. Fritzsche — Überraschungen bei Tiefbohrungen — 37
M. Brandt — War *Australopithecus robustus* ein Werkzeughersteller? — 39
S. Scherer — Schnelle Artbildung bei einem marinen Vielborster (Polychaeta) — 42
H. Binder — Neues zu alter DNA — 43

Streiflichter

Die Bedeutung von Leitgefäßen für den Sprung ans Land — 44
Molekulare und klassische Taxonomie bei Pflanzen
Artbildung ohne geographische Trennung — 45
Erneuter Hinweis auf frühen Ursprung der Blütenpflanzen?
Navigation am Himmel
Katastrophen und ihre Auswirkungen
Wie „naß" ist die Erdkruste? — 46

Leserecho — 46

Rezensionen

Th. Fritzsche — Gesteine. Entstehung – Zerstörung – Umbildung (Peter Rothe) — 47

EDITORIAL

Liefert uns die Natur ausreichende Informationen, um historische Abläufe rekonstruieren zu können? Diese Frage wirft Thomas FRITZSCHE im Prolog zu seinem Beitrag über die Ausbrüche des Mount St. Helens auf. Die Beiträge von Studium Integrale *journal* sollen schwerpunktmäßig einen Zusammenhang mit der Frage nach den Prozessen aufweisen, die in der Geschichte der Lebewesen, der Erde oder des ganzen Kosmos abgelaufen sind. Es ist offenbar ein menschliches und, wie wir meinen, ein legitimes Bedürfnis, größere Zusammenhänge erkennen zu wollen – nicht nur bezüglich der gegenwärtigen Prozesse in der Natur, sondern besonders auch in Herkunftsfragen. Doch dabei wird allzu leicht vergessen, daß der (Natur-)Wissenschaft als *einer* Methode des Zugriffs auf die Wirklichkeit enge Grenzen der Aussagemöglichkeiten gesetzt sind, daß ihre Ergebnisse daher vorläufigen Charakter haben und vor allem, daß wir weitgehend nur an der Oberfläche kratzen. Das wird paradoxerweise oft gerade dann umso deutlicher, je mehr wir wissen. Buchstäblich an der Oberfläche haben die Geowissenschaftler gekratzt, die sich dem Kontinentalen Tiefbohrprogramm verschrieben haben. Einer der Kurzberichte dieser Ausgabe widmet sich den überraschenden Ergebnissen dieser Untersuchungen. Eine besondere Gelegenheit, Rückschlüsse auf Ereignisse und Prozesse der Erdgeschichte zu ziehen, boten die Ausbrüche des Mount St. Helens Anfang der 80er Jahre. Thomas FRITZSCHE beschreibt die katastrophalen Ereignisse, die sich im einzelnen dort abgespielt haben. Schlußfolgerungen über vergleichbare Prozesse in der Erdvergangenheit sind allerdings nur mit Vorbehalten möglich. Überraschendes wurde auch bei einem anderen seltenen Ereignis beobachtet: Der Aufprall der Reste des Kometen Shoemaker-Levi auf den Planeten Jupiter war ein „Geschenk" für die Astrophysiker – ein „Makro-Experiment" vor der kosmischen Haustür.

„Die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit" – dieser in der Historischen Geologie bewährte, wenn auch keineswegs allgemeingültige Grundsatz läßt sich auch in der Biologie anwenden. So geht André WELLER in seinem Beitrag der Frage nach, wie der Vogelzug entstanden sein könnte. Hier konnte neuerdings gezeigt werden, daß das Zugverhalten sich in relativ kurzer Zeit ändern kann und offenbar stark von Genen beeinflußt wird. Für die Grundtypforschung ist das ein interessanter Befund, wird doch im Rahmen der Grundtypenbiologie ein großes Potential an Variationsmöglichkeiten der Grundtypen postuliert. Die Ergebnisse über das Zugverhalten bei Mönchsgrasmücken könnten einen ersten wichtigen Baustein darstellen, das Zugverhalten mikroevolutiv zu erklären, d. h. als Ausdruck einer bestimmten Ausprägungsmöglichkeit des in den jeweiligen Grundtypen vorhandenen genetischen Potentials.

Ein weiterer Beitrag befaßt sich explizit mit Grundtypstudien. Mit dem Sammelband *Typen des Lebens* (hgg. von S. SCHERER; Berlin 1993) wurde ein erster Überblick über bisherige Untersuchungen an Grundtypen vorgelegt. Das in diesem Band neu vorgeschlagene taxonomische Konzept bedarf noch vieler weiterer Untersuchungen. Klaus NEUHAUS vermittelt einen Einblick in seine Arbeiten zu den Grundtypen bei den Ananasgewächsen (Bromeliaceen). Damit wird ein weiterer Baustein für dieses Konzept geliefert.

Studium Integrale *journal* hat sich auch die Aufgabe gesetzt, Evolutionsanschauungen in den verschiedensten Wissensgebieten kritisch zu hinterfragen. Reinhard JUNKER tut dies am Beispiel der Deutung von Ähnlichkeit, die in den Lehrbüchern als eines der Hauptindizien für den postulierten Evolutionsprozeß in der Biologie gilt. Demgegenüber behauptet der Autor, daß es den „Ähnlichkeitsbeweis" der Evolution gar nicht gibt. Ähnlichkeit ist zwar evolutionär deutbar, steht aber auch der Deutung im Rahmen der Schöpfungslehre offen und zwingt, wie D. S. PETERS sagt, ohne Zusatz-annahmen keineswegs zu einem Glauben an Evolution.

Besonderes Interesse wird natürlich immer wieder den Fragen nach der Herkunft unserer eigenen Gattung entgegengebracht. Gibt es einen genealogisch nachvollziehbaren Weg von affenartigen Primaten zum Menschen? Sigrid HARTWIG-SCHERER zeigt in ihrem Beitrag, weshalb in jüngerer Zeit wieder vermehrt an den Nahen Osten als Ausbreitungszentrum des Menschen gedacht wird – eine für die Schöpfungslehre höchst interessante Diskussion! In einem weiteren Beitrag zur Paläanthropologie wertet Michael BRANDT Indizien für einen eventuellen Werkzeuggebrauch von *Australopithecus,* einer ausgestorbenen Menschenaffengattung, die viele Evolutionstheoretiker in eine direkte Abstammungslinie zum Menschen stellen.

Vielleicht können die Beiträge auch ein Stück weit etwas von der Faszination Wissenschaft vermitteln und deutlich machen, wie die wissenschaftliche Durchdringung unserer Welt trotz einer längst unübersehbar gewordenen Datenfülle immer noch für Überraschungen gut ist.

Ihre Redaktion Studium Integrale *journal*

Die Ausbrüche des Mount St. Helens – und die Folgen

Thomas Fritzsche, Bahnhofstr. 2, D-37139 Adelebsen

Zusammenfassung: **Die Ausbrüche des Mount St. Helens im Jahr 1980 und in den folgenden Jahren führten in der näheren Umgebung zu erheblichen Zerstörungen. Durch die seitliche Explosion am 18. Mai 1980 wurde nördlich des Vulkans eine fast 600 km² umfassende Landschaft vernichtet. Schuttmassen stürzten in den benachbarten Spirit Lake, lösten eine gewaltige Flutwelle aus und hinterließen eine über 60 m mächtige Sedimentschicht. Auf dem See treibt seitdem eine langsam kleiner werdende Matte aus abgerissenen Baumstämmen. Mehrere Fluß-systeme wurden von den Schuttmassen und der Vulkan-asche überdeckt, der Abfluß des Wassers war verhindert oder eingeschränkt. Den größten Schaden verursachten die durch die Explosion ausgelösten Schlammströme, von denen auch Gebiete weit außerhalb der abgesperrten Region betroffen waren (Abb. 3). Knapp 15 Jahre nach dem Ausbruch haben sich Flora und Fauna von der Katastrophe teilweise erholt (siehe auch zusammenfassende Abb. 2).**

Prolog

„Die Gegenwart ist der Schlüssel zur Vergangenheit", so lautet in Kurzform das Arbeitsprinzip der Historischen Geologie, der Wissenschaft, die die geologische Erdvergangenheit erforscht. Dieses Aktualismus-Prinzip hat sich vortrefflich bei der Rekonstruktion geologischer Vorgänge bewährt; es ist nur natürlich, wenn wir unser heutiges Umfeld mitsamt den beobachteten und beobachtbaren Ereignisabfolgen in die Vergangenheit projizieren und nach Bekanntem suchen.

Dennoch hat das Aktualismus-Prinzip seine Grenzen, über die hinaus das Heute nur noch mit erheblichen Einschränkungen zur Beschreibung historischer Prozesse dienen kann. Im Laufe geologischer Forschungstätigkeit hat sich gezeigt, daß die Erde im Wandel begriffen ist, also letztlich einem irreversiblen Zeitpfad folgt. Eindrucksvoll zeugen davon die ausgestorbenen Tierarten, die eine uns fremd anmutende Lebewelt repräsentieren; die Flora der Karbonwälder unterstreicht diese Unterschiede. Doch nicht allein die Paläontologie berichtet von Veränderungen: Das Vorkommen ausgedehnter Salzlager läßt sich durch kein heutiges Pendant beschreiben, die Kontinente waren einst ganz anders auf dem Globus verteilt und wie es scheint kennzeichnet unser Globalklima keineswegs die in den Gesteinsdokumenten belegten einstigen Verhältnisse.

Überhaupt muß gefragt werden, ob uns die Natur ausreichende Informationen liefert, um vergangene Prozesse erkennen zu können. Seltene Ereignisse, wie z.B. Meteoritenimpakte, können wir zur Zeit auf der Erde nicht unmittelbar studieren – glücklicherweise. Außerdem können verschiedene Faktoren mit wechselnden Anteilen zusammenwirken, oft ist das wirksame Agens (z.B. das Wasser beim Sedimenttransport und der folgenden Ablagerung) verschwunden, und wir müssen zu Analogien greifen. Schließlich bleibt zu bedenken, daß wir in den Gesteinen und vielen heutigen Landschaftsformen nur Wirkungen studieren, die auf mehreren Wegen (Ursachen) entstanden sein können.

Ein Vulkanausbruch, zudem ein so gut untersuchter wie der des Mount St. Helens, ist deshalb für den Wissenschaftler ein willkommenes Naturereignis, um das aktualistische Handwerkszeug zu verfeinern und gegebenenfalls zu ergänzen. Lipman & Mullineaux (1981, 3) weisen auf die ausgesprochen beobachtungsfreundlichen Umstände hin: Zum Zeitpunkt der großen Explosion herrschte klare Sicht, es war Wochenende, d.h. zahlreiche Fotographen waren rings um den Vulkan in gespannter Erwartung, und der Ausbruch erfolgte am frühen Morgen, es gab also genügend Zeit, die Auswirkungen bei Tageslicht zu verfolgen.

Plattentektonik und Vulkanismus

Erdbeben und Vulkanausbrüche gehören zu den markantesten Erscheinungen, durch die sich das Erdinnere mitteilt: Erdbeben sind die Folge von Spannungsentlastungen im Untergrund, Vulkane führen die in der Erde angestaute Wärme ab, indem sie vulkanisches Material ausstoßen. Von diesen Ereignissen gehen große Gefahren aus: die Zahl der durch Erdbeben und Vulkanausbrüche getöteten Menschen geht allein für die letzten Jahrhunderte in die Millionen. Dabei bringen nicht immer die unmittelbaren Naturereignisse Tod und Verderben: Erdbeben unter den Ozeanen (z.B. in der Nähe des Japanischen Inselbogens) oder Vulkanausbrüche auf Inseln (z.B. Krakatau) können meterhohe Flutwellen erzeugen, die in Küstenregionen zu verheerenden Überschwemmungskatastrophen führen.

Die Verteilung der Erdbebenzentren, aber noch mehr die der aktiven Vulkane, folgt einem bestimmten Muster, das eng an die tektonischen Großstruk-

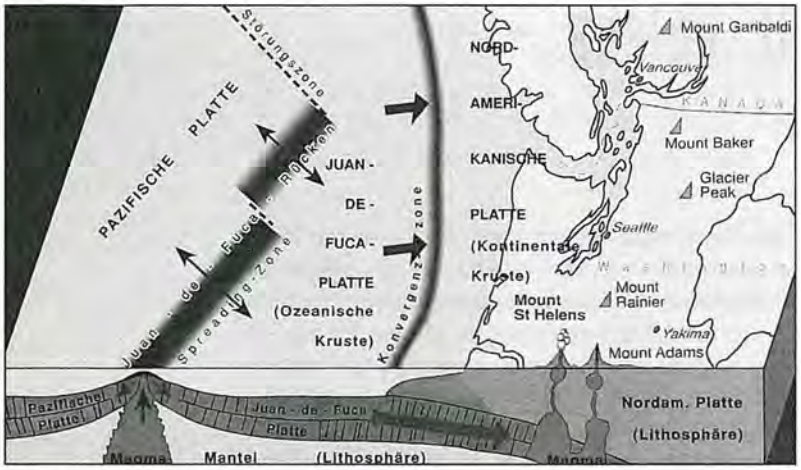


Abb. 1: Im Bereich des Kaskadengebirges schiebt sich ozeanische Kruste unter die Nordamerikanische Platte. Im Untergrund schmilzt ein Teil des Gesteins auf und dringt als Magma in höhere Krustenbereiche vor. Die Juan de Fuca-Platte ist im Vergleich zu anderen Plattenheinheiten recht klein, die Spreizzone – der sog. Mittelozeanische Rücken – liegt nicht weit von der Küste entfernt, so daß man gerade hier nicht von einer typischen Konvergenzzone nach dem Modell der Plattentektonik sprechen kann. (Verändert nach FOXWORTHY & HILL 1982; Grafik: Hanna JORDAN und Johannes WEISS)

turen der Erde gekoppelt ist. Die Erdoberfläche läßt sich in rund ein Dutzend größere und zahlreiche kleinere Lithosphärenplatten unterteilen. Sie sind etwa 100 km dick und „schwimmen" auf einer Mantelzone, in der ein geringer Anteil festen Materials unter den dort herrschenden hohen Drücken und Temperaturen geschmolzen ist. Dadurch können sich die Platten gegeneinander bewegen: Stoßen sie zusammen, falten sich Gebirge auf, wie z.B. die Alpen oder der Himalaya. Gleiten sie aneinander vorbei, können sie sich verkeilen – das Nachrücken erfolgt dann ruckartig und äußert sich in Erdbeben, wie z.B. am San Andreas-Graben in Kalifornien. Dazu kommt aber noch der Unterschied zwischen kontinentaler und ozeanischer Kruste. Die kontinentale Kruste ist leichter, sie hat gewissermaßen einen Auftrieb. Die ozeanische Kruste, die aus basaltischem Gestein besteht, ist schwerer und kühler. Treffen diese Krustenarten in einer sog. Konvergenzzone aufeinander, wird sich die ozeanische unter die kontinentale Kruste schieben und in den Erdmantel abtauchen. Rund um den Pazifik ist diese Situation gegeben; die Aufschmelzprozesse im Untergrund führen an der Erdoberfläche zur Entstehung von Vulkanen, man spricht in diesem Zusammenhang auch vom zirkumpazifischen Vulkangürtel oder Feuerring. Ihm gehören viele der über 500 aktiven Vulkane an, auch die Vulkane an der Westküste Nordamerikas (HUGHES et al. 1980).

In den Konvergenzzonen verschluckte Kruste wird an den Mittelozeanischen Rücken erneuert, indem Magma nach oben dringt und an die Kontinentalplatten angeschweißt wird. Bei diesen Rücken handelt es sich um ein weltumspannendes, 65.000 km langes Gebirgssystem, das nur an einigen Stellen unterbrochen ist und im Atlantik mehr als 2 km über dem Ozeanboden aufragt. Nach dem Modell der Plattentektonik stellt man sich einen Kreisprozeß mit Konvektionswalzen im Erdmantel vor, der allerdings noch nicht nachgewiesen ist. Nicht weit vor der Küste Nordamerikas verläuft solch ein Mittelozeanischer Rücken und begrenzt auf der Westseite ein kleines Krustenelement, die sog. Juan de Fuca-Platte. Im Osten taucht sie unter die Nordamerikanische Platte ab, wobei die Reibungsprozesse im Untergrund als Ursache der Magmenentstehung und schließlich der Vulkankette im Kaskadengebirge angesehen werden (Abb. 1).

Der Mount St. Helens ist ein Strato- oder Schichtvulkan: Lavaströme von unterschiedlichem Chemismus (und damit anderer Gesteinsbezeichnung, siehe Infokasten 2) wechseln mit verfestigten Lagen von grobkörnigen pyroklastischen Strömen oder sog. Ignimbriten. Wegen ihres hohen Gasgehalts und der Zähflüssigkeit der Magmen sind diese Vulkane außerordentlich explosiv; weil die Lava nicht einfach ausfließt, sondern z.T. noch während des langsamen Aufstiegs erstarrt, sind die Vulkanbauten meist steil. Treffen angesammeltes Grundwasser, Schnee oder Eis und heißes Magma zusammen, können sich gewaltige Explosionen entwickeln, bei denen Teile der Vulkanbauten regelrecht pulverisiert werden (SCHMINCKE 1986).

Die jüngste Eruptionsphase des Mount St. Helens

Chronologie

Ein Erdbeben der Stärke 4,1 am 20. März 1980 und eine erste Dampf- und Aschenexplosion 7 Tage spä-

Infokasten 1: Steckbrief des Mount St. Helens

Lage: Bundesstaat Washington, USA. Kaskadengebirge, im Gifford Pinchot Nationalpark, 80 km nördlich von Portland, Oregon.

Name: Nach Baron St. Helens (brit. Gesandter in Spanien); Ende des 18. Jahrhunderts von Kapitän G. Vancouver so benannt.

Höhe: 2.951 m vor der Eruption, 2.550 m nach der Eruption

Alter: ca. 50.000 Jahre nach physikalischer Datierung, der zuletzt bekannte Vulkanbau wird auf 3.000 Jahre geschätzt.

Ausbrüche: Letzte Ausbruchsphase zwischen 1831 und 1857; im Jahr 1980 sechs Ausbrüche: 18. Mai, 25. Mai, 12. Juni, 22. Juli, 7. August und 16.-18. Oktober. Weitere kleinere Eruptionen in den folgenden Jahren.

Gestein: breites Spektrum an Laven von andesitischer bis basaltischer Zusammensetzung, meist jedoch dazitisch.

Struktur: Strato- oder Schichtvulkan, mit dem typisch großen Verhältnis von Höhe zu Breite. Schmelze sehr zäh, bildet oft eine Art „Pfropf", der Dom genannt wird. Während der jüngsten Ausbruchsphase mehrmals eine Dombildung.

ter kündeten das Wiederaufleben eines nur vorübergehend ruhigen Vulkans an. Noch in den 70er Jahren hatten Wissenschaftler vom Geological Survey den Mount St. Helens als den zur Zeit gefährlichsten Vulkan im Kaskadengebirge bezeichnet und Eruptionen innerhalb der nächsten Jahrzehnte prognostiziert (CRANDELL et al. 1975). Die spektakulären, aber harmlosen Dampfexplosionen zogen die Wissenschaftler ebenso an wie unzählige Schaulustige. Täglich wurden mehr als zwei Dutzend leichterer Erdbeben registriert, schmelzendes Eis und kleinere Lawinenabgänge wurden als Vorboten größerer Ereignisse gedeutet. In der Gipfelregion entstand ein kleiner Krater, neben dem sich in den folgenden Tagen ein weiterer entwickelte; mit der Zeit wuchsen beide zu einem großen Krater zusammen. Als im April das Wetter so günstig war, um die Topographie des Berges vom Flugzeug aus genau zu vermessen und sie mit den Aufnahmen aus vorherigen Jahren zu vergleichen, fiel eine Erhebung am Nordhang des Vulkans auf. Täglich beulte sich diese Stelle des Berges um mehr als einen Meter aus, ein Anzeichen für aufsteigendes Magma innerhalb des Vulkans. Die zunehmende Instabilität des Nordhanges und die ungewissen Prozesse im Vulkaninnern veranlaßten die Wissenschaftler zu nachdrücklichen Warnungen vor größeren Lawinen oder einem bevorstehenden Ausbruch (zur Chronologie siehe u.a. CHRISTIANSEN & PETERSON 1981; Infokasten 1).

Am 18. Mai 1980 um 8 Uhr 32 war es dann soweit: Zunächst erschütterte ein Erdbeben der Stärke 5,1 den Berg. Zu diesem Zeitpunkt überflog das Geologen-Ehepaar STOFFEL gerade den Vulkan; vom Flugzeug aus sahen sie, wie sich der gesamte Nordhang zuerst regelrecht kräuselte und dann in zwei Etappen abrutschte. Durch das Abgleiten dieser Auflast konnte sich das unter hohem Druck stehende Gas ausdehnen und entlud sich in gewaltigen, neun Stunden anhaltenden Explosionen.

Eine mindestens 300°C heiße Dampfwolke, beladen mit Asche und Staub, strömte mit einer Geschwindigkeit von mehreren 100 km/h in einem breiten Kegel vom Vulkan weg; eine Fläche von fast 600 km² wurde innerhalb weniger Minuten vernichtet, die Wolke legte bis zu 28 km zurück. Unmittelbar dahinter türmte sich eine kilometerhohe Aschewolke auf, die jede Sicht versperrte; unter ihr hat der Hitzetod praktisch alles Leben zerstört. Pyroklastische Ströme fegten den Berghang hinab und hinterließen charakteristische Ablagerungen; Asche und Bimssteinchen rieselten langsam auf die Landschaft nieder und bedeckten sie mit einer dicken Staubschicht. Die Explosionswolke über dem Vulkan stieg mehr als 20 km hoch; sie breitete sich in östlicher und nordöstlicher Richtung aus. Bereits am Nachmittag des 18. Mai hatte sich die Aschewolke über mehrere Bundesstaaten ausgebreitet. In den Ortschaften, die nur einige Dutzend Kilometer vom Vulkan entfernt liegen, drang der Staub in jede Ritze, legte Autos und Elektrogeräte lahm und führte zu Sicht- und Atemproblemen.

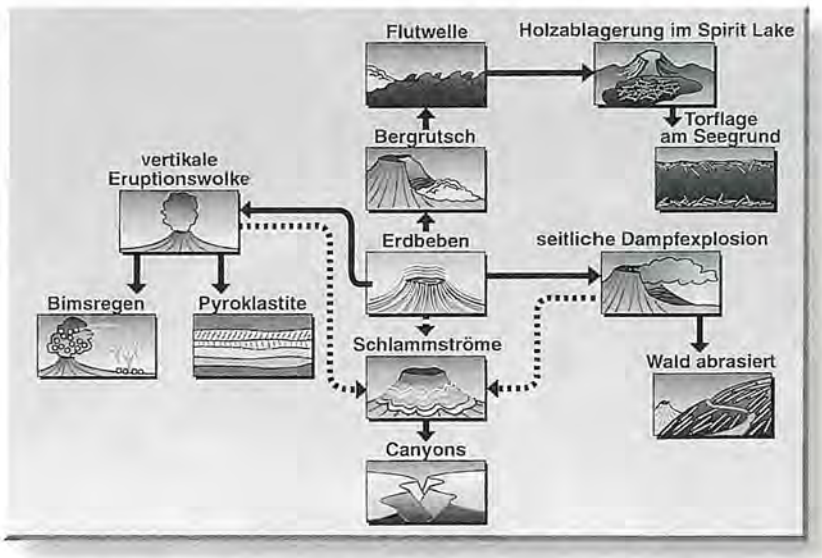


Abb. 2: Die wichtigsten Ereignisse während der jüngsten Eruptionsphase des Mount St. Helens in einer Grafik. Die meisten Vorgänge sind dank eines umfangreichen Beobachtungsnetzes gut dokumentiert. Im Text nicht erwähnt sind die Pyroklastite (das ist der Oberbegriff für vulkanische Lockergesteine) und die Torflage auf dem Seegrund, d.h. Ablagerungen von feinerem organischem Material. (Nach AUSTIN 1991; Grafik: Johannes WEISS)

Die beeindruckendste Folgeerscheinung ist der niedergerissene Wald: Selbst Bäume von 2 m Durchmesser wurden einfach umgeblasen oder mitgerissen. Durch die Hitze wurden Laub, Rinde und Nadeln versengt. Der vorausgegangene Bergrutsch, bei dem 2,3 km³ Gestein freigesetzt wurden, führte in der Nähe des Vulkans zu gravierenden topographischen Veränderungen. Die Ablagerungen am Fuß des Vulkankegels sind rund 200 m mächtig. Ein Teil der Schuttmasse stürzte in den Spirit Lake und löste eine gewaltige Wasserwelle aus. Der Schutt bedeckte den Seegrund und hob den Wasserspiegel um fast 90 m an. Abgerissene Baumstämme wurden in den See gespült und bildeten auf der Oberfläche eine gewaltige schwimmende Matte. Der größere Teil der Schuttmenge wälzte sich jedoch als Schlammstrom in den Oberlauf des Toutle River, eine 21 km lange, 1-2 km breite und bis 150 m mächtige Ablagerung hinterlassend. Aus Schutt, Asche und Wasser entwickelten sich weitere Schlammströme, die außerhalb der verwüsteten Landfläche große Schäden anrichteten.

Auf der weiten Fläche vor dem Vulkan hatte sich eine dicke Ablagerung 300°C heißen Bimssteins gebildet. Darunter waren noch Schnee und größere Eisbrocken begraben, die in den folgenden Tagen schmolzen und weitere Dampfexplosionen auf der Bimssteinebene verursachten; dabei entstanden Einsturztrichter von bis zu 600 m Durchmesser, die Explosionswolken stiegen fast 2 km hoch.

Die Eruptionstätigkeit begann in den frühen Abendstunden des 18. Mai 1980 abzuklingen. Durch die Vulkanexplosion war ein 750 m tiefer Krater ausgesprengt worden. Die höchste Stelle am Kraterrand maß 2.550 m, damit hatte der Vulkan 400 Höhenmeter verloren (Abb. 3). Über 1 km³ vulkanische Lockermassen (Tephra) waren ausgeworfen worden; bezogen auf magmatisches Gestein mit einer Dichte von 2,6 entspricht diese Menge einem

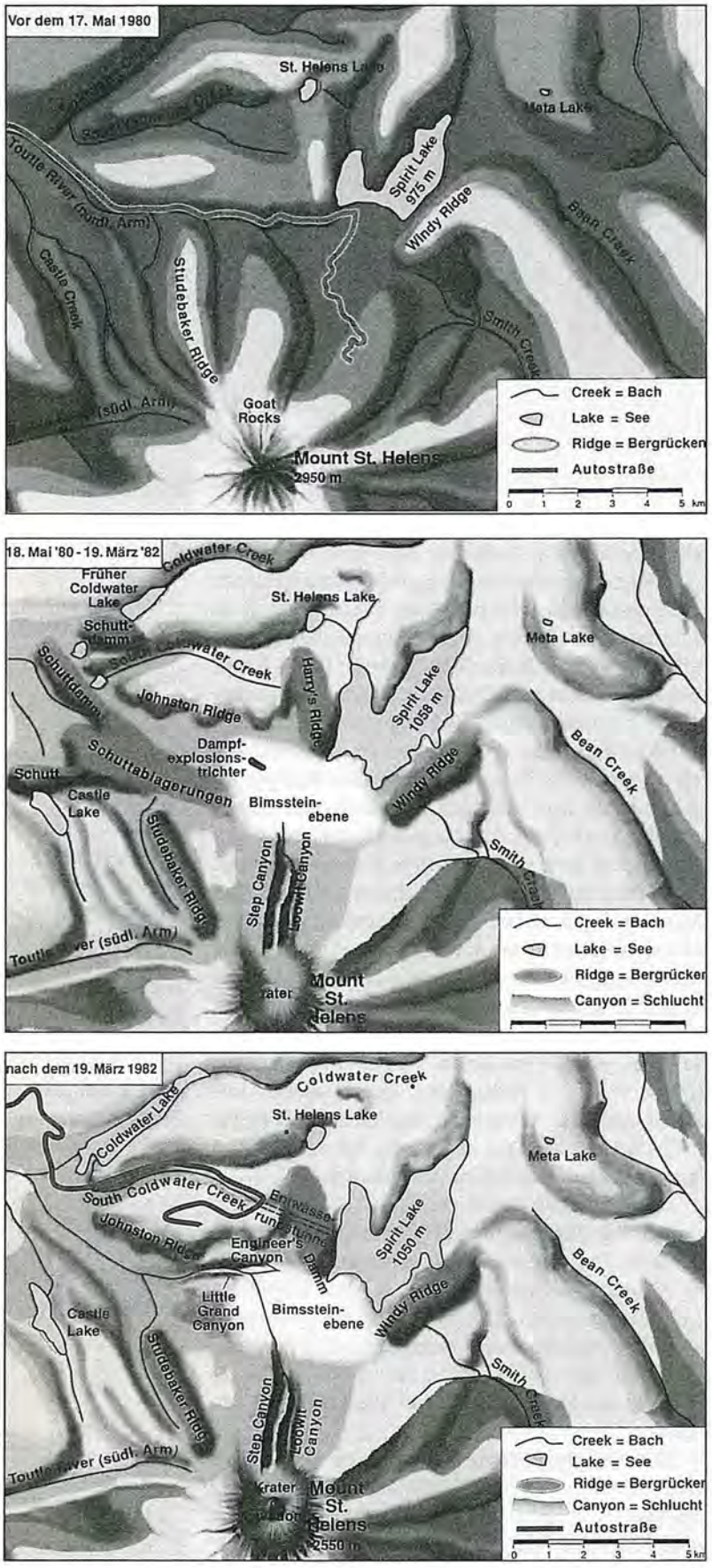


Abb. 3: Die Gegend nördlich des Vulkans vor und nach dem Ausbruch am 18. Mai 1980. a) Oberhalb der Goat Rocks war die Stelle am Berg, die sich vor dem Ausbruch täglich um über 1 m ausdehnte. Der Nordarm des Toutle River hat ein typisches Entwässerungssystem; im Flußtal verläuft ein Straße bis zu einem Aussichtspunkt (Timberline Viewpoint). Die Wasserfläche des Spirit Lake liegt 975 m üNN.
b) Nach dem Ausbruch hat sich die Landschaft drastisch verändert. Vor dem neu entstandenen Krater haben sich kleine Canyons gebildet. Auf der Bimssteinebene zwischen Vulkan und Spirit Lake kommt es in den ersten Wochen zu weiteren Dampfexplosionen und der Bildung von Einsturzkratern. Der Nordarm des Toutle River ist mitsamt seinen Zuflüssen unter einer ausgehnten Schuttmasse begraben. Schuttdämme verhindern den Abfluß des Wassers, hinter einigen Schuttdämmen stauen sich neue Seen auf. Die Wasserfläche des Spirit Lake liegt jetzt 1058 m hoch, die Fläche des Sees hat sich fast verdoppelt.
c) Nach dem Schlammstrom vom 19. März 1982 konnte sich im Tal des Toutle River wieder ein Entwässerungssystem ausbilden. Gegenüber der Situation vor dem 18. Mai 1980 sind einige bleibende topographische Veränderungen festzustellen: vergrößerte Seefläche des Spirit Lake, neue Seen (Coldwater Lake, Castle Lake), Vulkankrater, kleine Canyons (Step Canyon, Loowit Canyon) (Nach FOXWORTHY & HILL 1982, AUSTIN 1991; Grafik Hanna JORDAN und Johannes WEISS).

Gesteinsvolumen von 0,25 km^3. Die abgegebene Leistung am 18. Mai 1980 entsprach etwa der hundertfachen Kapazität aller amerikanischen Kraftwerke (DECKER & DECKER 1981).

Wahrscheinlich kamen 60 Menschen bei dem Ausbruch ums Leben; etwa die Hälfte von ihnen gilt als vermißt. Dank der umfangreichen Evakuierungsmaßnahmen konnte Schlimmeres verhindert werden. Trotzdem mißachteten viele Menschen die Straßensperren, um näher an den Vulkan heranzukommen. Die Zahl der Todesopfer hätte auch höher ausfallen können, wäre der Vulkan nur einen Tag später ausgebrochen: Am nächsten Morgen sollten 200 Mitarbeiter eines Holzfällerbetriebs ihre Arbeit in der betroffenen Region aufnehmen. Die bekanntesten Opfer sind David A. JOHNSTON, ein junger Vulkanologe, der den Ausbruch von seinem Beobachtungsposten 8 km nördlich des Vulkans miterlebte und sich noch über Funk meldete, und der 84-jährige Harry TRUMAN, der seine Lodge unmittelbar am Spirit Lake trotz ernster Mahnungen nicht verlassen wollte, da er nicht mit einem größeren Ausbruch rechnete – sein damaliger Kommentar: „Niemand weiß mehr über diesen Berg als Harry." Einige Zerstörungen erwiesen sich im nachhinein als nicht so gravierend, wie zunächst befürchtet. Schon einige Monate nach dem Ausbruch wurden Tierspuren in der verwüsteten Landschaft entdeckt, die auf eine rasche Wiederbesiedlung hoffen ließen. Auch die Nutzpflanzen unter der dicken Staubschicht waren nicht völlig vernichtet; oft wurden die Pflanzen unter der Staubdecke nur „versiegelt", örtlich wurden sogar höhere Ernteerträge erzielt. Bereits wenige Tage nach dem Ausbruch erkannte der damalige US-Präsident CARTER die kommerzielle Bedeutung: Der Mount St. Helens könne zu einer Touristenattraktion werden, nur noch vergleichbar dem Grand Canyon.

Ablagerungen durch pyroklastische Ströme

Die Gegend nördlich des Vulkans wirkte nach dem Ausbruch wie eine Mondlandschaft. Über die von Vegetation entblößte Landschaft legte sich eine feine Ascheschicht, die das Endstadium von pyroklastischen Strömen kennzeichnet. Ein pyroklastischer Strom ist eine Art heißer Partikelwolke, die sich mit hoher Geschwindigkeit ausbreitet. Sie entsteht, wenn Teile der Eruptionswolke in sich zusammenfallen und den Berghang hinunterrasen. Durch die seitliche Eruption des Mount St. Helens sind die Vorgänge etwas komplizierter, als man sie sich idealerweise vorstellt (Abb. 4). Vulkanisches Material wurde gleich seitlich herausgeschleudert und erhielt später vermutlich noch Nachschub von Aschen, die nicht sehr weit über den Vulkanschlot hinaufgestiegen waren. Je nach Transportmechanismus und Korngrößenverteilung in den Ablagerungen unterscheidet man zwischen einem pyroklastischen Strom und einem pyroklastischen Surge (WALKER & MCBROOME 1983). Für die Ablagerungen am Mount St. Helens werden beide Bezeichnungen benutzt, im folgenden wird der Begriff „pyroklastischer Strom" verwendet. Zur Entstehung des initialen pyroklastischen Stroms am 18. Mai haben drei Faktoren beigetragen:
(a) hydrothermales Wasser im Untergrund und in den Klüften des Gesteins wurde infolge der Druckentlastung schlagartig in Dampf umgewandelt,
(b) magmatische Gase wurden aus dem zerschmetterten Gestein herausgelöst und
(c) durch den Kontakt mit heißen vulkanischen Partikeln wurden Wasserdampf und Gase aufgeheizt (MOORE & SISSON 1981).

Die Freisetzung vulkanischer Gase aus der zähflüssigen Schmelze (b) dürfte nur von untergeordneter Bedeutung gewesen sein; die plötzliche Dampfexplosion (a) war wahrscheinlich der wichtigste Beitrag, darüber hinaus lassen sich die Anteile nicht näher abschätzen. Die zusätzliche Erwärmung von Luft, Dampf und Gasen durch heiße dazitische (siehe Infokasten 2) Partikel wird auch durch die Beobachtung gestützt, daß die stärkste Schädigung von Bäumen an den Stellen erfolgte, wo die größten Mengen magmatischen Materials liegen. Die Temperatur dürfte dort um 350°C betragen haben. Die Geschwindigkeit des pyroklastischen Stroms wird am Fuß des Vulkans auf rund 600 km/h geschätzt, im Randbereich – etwa 25 km vom Vulkan entfernt – war sie auf 100 km/h abgeklungen. Von Überlebenden wird berichtet, daß die Hitzewelle weniger als 2 Minuten angehalten habe (ROSENBAUM & WAITT 1981).

Offenbar erfolgten die Zerstörungen, wie z.B. das Umreißen der Bäume, nicht synchron mit der Schallwelle der Explosion, sondern wurden von der Druckwelle des vernichtenden pyroklastischen Stroms erzeugt. Dieser soll an der Front ca. 200 m hoch gewesen sein, dahinter türmten sich dann

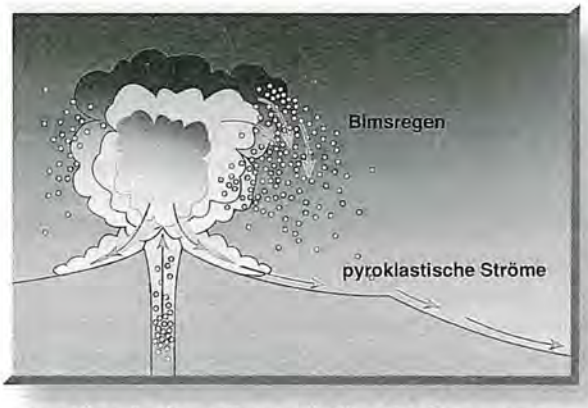


Abb. 4: Schematische Darstellung der Entstehung von pyroklastischen Strömen. Aus dem Krater explosiv freigesetztes Gas, frisches Magma und Bruchstücke des alten Vulkanbaus werden in die Luft gestoßen. Teile der Gaswolke verlieren ihren Auftrieb, sinken zusammen und strömen hangabwärts. Pyroklastische Ströme sind sehr heiß; in der Regel kann sich diese dichte, turbulent fließende Gaslawine nur einige Kilometer weit ausbreiten. Bei derartigen Vulkanexplosionen „regnen" oftmals gasgefüllte Lavafetzen als Bimssteine nieder.
(Grafik: Johannes WEISS und Hanna JORDAN)

gewaltige Aschewolken auf. Obwohl die neunstündige Ausbruchsphase ungewöhnlich gut dokumentiert ist, bereitete es Schwierigkeiten, die einzelnen Beobachtungen und den zeitlichen Ablauf der Eruption mit den Ablagerungen zu korrelieren. Nach ausführlichen stratigraphischen Analysen unterscheidet man heute sechs Phasen mit jeweils verändertem Eruptionsverhalten; der komplexe Verlauf des Ausbruchs mit wechselnder Magmenzu-

Infokasten 2: Magmatische Gesteine

Vulkanische Gesteine oder Vulkanite gehören zu den magmatischen Gesteinen oder Magmatiten. Die zweite wichtige Gruppe magmatischer Gesteine sind die Plutonite oder Tiefengesteine; zwischen diesen beiden Gruppen gibt es noch die Ganggesteine. Während die Plutonite in mehreren Kilometern Tiefe erstarren und mit der Zeit größere Kristalle ausbilden können, erfolgt die Abkühlung der Vulkanite rasch – sie sind meist feinkörnig oder enthalten größere Kristalle in einer feinkörnigen, teilweise glasigen Grundmasse. Bekannte Beispiele sind der Granit als Tiefengestein und der Basalt als vulkanisches oder Ergußgestein.

Ein einfaches Klassifikationsschema nutzt die chemische Zusammensetzung des ursprünglichen Gesteinsbreis, des Magmas. Die beiden häufigsten Elemente der Erdkruste sind Sauerstoff (chem. Symbol: O) und Silizium (chem. Symbol: Si); sie verbinden sich zu SiO_2. Nach dem SiO_2-Gehalt werden die Plutonite und Vulkanite wie folgt untergliedert:

Plutonite	Gabbro	Diorit	Syenit	Granit
Vulkanite	Basalt	Andesit	Trachyt	Rhyolith
	"basisch"			„sauer"
	SiO_2-Gehalt			SiO_2-Gehalt
	weniger als 52%			mehr als 65%

Das dem Granit entsprechende Ergußgestein ist also der Rhyolith. Auch wenn die Gesteine chemisch identisch sind, führt ihre unterschiedliche Entstehung rein äußerlich zu einem ganz anderen Gestein.

Beim jüngsten Ausbruch des Mount St. Helens wurde sog. Dazit gefördert; hierbei handelt es sich um ein vulkanisches Gestein, das aufgrund seiner Mineralzusammensetzung zwischen Rhyolith und Andesit anzusiedeln ist. Auch bei den älteren Ausbrüchen waren dazitische Laven vorherrschend, doch wurden dazwischen auch Andesite und Basalte gefördert – ein klarer Hinweis auf die komplexen Vorgänge unter dem Vulkan (SMITH & LEEMAN 1993).

sammensetzung, Kristallgröße und anderen Eigenschaften läßt sich auch im Strömungsmodell nachvollziehen (CRISWELL 1987, PAPALE & DOBRAN 1994).

Typisch für die Ablagerungen pyroklastischer Ströme sind ihre Mächtigkeiten: In unmittelbarer Umgebung des Vulkans können sie 10 m und mehr betragen, mit zunehmender Entfernung vom Vulkan nehmen sie rasch ab. Die Ablagerungen passen sich der gegebenen Topographie an, d.h. sie umfließen Hindernisse. Weitere Merkmale sind die Abnahme der Korngröße mit wachsendem Abstand vom Eruptionszentrum und die Gradierung, also eine Sortierung nach der Korngröße, die sich in der Detailansicht als feine Schichtung äußern kann (TUCKER 1985). Vergleichbare Ablagerungen findet man in Mitteleuropa in der Nähe des Laacher Sees (SCHMINCKE 1986); nur wenige Kilometer vom Krater entfernt betragen die Mächtigkeiten der Schichten rund 35 m, als Talfüllungen erreichen sie auch 60 m; heute nimmt man an, daß die mächtigen Ablagerungen innerhalb weniger Tage entstanden (SCHMINCKE 1986). Vulkanische Partikel, die von pyroklastischen Strömen transportiert wurden oder langsam niederregneten, stellen einen Spezialfall der Sedimentation dar; als Produkte von Vulkanen sind sie ausfließenden Laven verwandt. Im Gegensatz zu anderen Sedimenten handelt es sich um ausgesprochen kurzfristige Bildungen (TUCKER 1985).

Spirit Lake

Die in den Spirit Lake stürzenden Schuttmassen und der Ascheregen haben den See schlagartig verändert (LARSON 1993). Die Wasserkapazität wurde zwar geringfügig vermindert, doch lag das Seebecken infolge der Einschwemmung dieser großen Sedimentmenge um über 80 m höher als zuvor; deshalb war die Oberfläche des Spirit Lake nunmehr fast doppelt so groß. Da die Ablagerungen des jüngsten Ausbruchs die Entwässerung des Sees verhinderten, die Zuflüsse aber den Seespiegel ansteigen ließen, verdichtete sich 1982 die Gefahr, daß es zu einem Dammbruch und damit einer gewaltigen Wasser- und Schlammflut kommen könnte. Deshalb begann man zunächst Wasser aus dem See abzupumpen; dann wurde ein Tunnel gebohrt, durch den der See seit 1985 entwässert.

Vor dem Ausbruch war der Spirit Lake ein vergleichsweise gering belebter See – der Fischbestand wurde mit Rücksicht auf die vielen Urlauber und Freizeitfischer jedes Jahr aufgestockt. Durch den Ausbruch gerieten heißes Gestein, Asche und Wasser in den See, die Temperatur stieg von 10°C auf 30°C. Diesem Temperaturschock haben viele Kleinlebewesen nicht standhalten können. Die Konzentration der im Wasser gelösten Mineralstoffe nahm beträchtlich zu, in einigen Fällen, wie z.B. beim Eisen und Mangan, um ein Tausendfaches. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff stieg ebenfalls

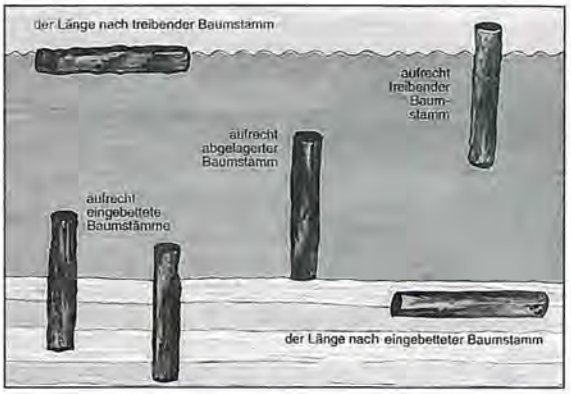


Abb. 5: Schematische Darstellung der Schwimm- und Ablagerungspositionen von Baumstämmen im Spirit Lake. Seit dem Ausbruch treibt eine gewaltige Matte aus Baumstämmen auf dem Spirit Lake. Die Zahl der Stämme hat sich bis heute mehr als halbiert; viele sanken inzwischen auf den Grund. Einige Stämme treiben allerdings in senkrechter Position. Wenn sie absinken, können sie in aufrechter Position auf dem Seegrund abgesetzt werden; eine vorsichtige Schätzung hat ergeben, daß rund 20.000 Stämme im Seebecken „stehen" (COFFIN 1987). Mit der Zeit werden sie in unterschiedlichen Horizonten einsedimentiert – möglicherweise handelt es sich hier um die Vorstufe der Entstehung eines „fossilen Waldes".
(Nach AUSTIN 1991; Grafik: Hanna JORDAN)

rapide an, dagegen wurde der Sauerstoff zunächst völlig aufgebraucht. Aus einem klaren See war ein trübes Gewässer geworden. Schon im Jahr 1982 – und damit viel früher als erwartet – begann sich der See zu regenerieren; der Sauerstoff wurde nicht mehr aufgebraucht, das Wasser wurde klarer. Heute ist der See belebter als vor dem Ausbruch, aber auch der Artenbestand hat sich gewandelt. Eines scheint heute gewiß: der See wird nie mehr in den Zustand zurückkehren, der vor dem Ausbruch herrschte.

Eine Besonderheit ist sicherlich die auf dem See treibende Vegetationsmatte, die aus ab- oder mitgerissenen Baumstämmen, aber auch aus bereits gefällten Hölzern besteht. Die Zahl der Stämme wird auf eine Million geschätzt. Unter den im wesentlichen in waagrechter Position schwimmenden Stämmen wurden auch einige aufrecht treibende entdeckt. Tauchexpeditionen erbrachten den Nachweis, daß ein Teil dieser Stämme auf dem Seegrund aufsetzt, andere aber frei im Wasser schweben (COFFIN 1983). Wenn das Holz mit Wasser gesättigt ist, ist das eine Ende etwas dichter als das andere; der Stamm driftet in eine vertikale Position und beginnt mit der Zeit abzusinken (Abb. 5). Die meisten Baumstämme scheinen aber in horizontaler Lage zu sinken und liegen schließlich auf dem Seegrund. Da sich die Ablagerung der Baumstämme aus der Matte über viele Jahre hinzieht, gleichzeitig aber durch die verstärkte Erosionstätigkeit im Einzugsbereich des Sees viel feines Material eingeschwemmt wird, werden die Baumstämme in unterschiedlichen Sedimenthorizonten eingebettet. Echolotmessungen haben gezeigt, daß die aufrecht abgesetzten Baumstämme Abstände voneinander haben, wie sie natürlich gewachsene Bäume eines Waldes aufweisen (COFFIN 1987).

Die eindrucksvolle Absetzung aufrechter Baumstämme auf dem Seegrund ist allerdings nicht das einzige Beispiel für den Verbleib und die teilweise Konservierung organischen Materials. Bei früheren Ausbrüchen wurden Baumstämme von Laharen (s. u.) mitgerissen und finden sich noch heute in den Lockermassen. Andere Stämme wurden zwischen pyroklastischen Strömen eingebettet und sind in Holzkohle umgewandelt (CRANDELL 1987, 74); an ihnen sind Datierungen mittels der Radiokarbon-Methode ausgeführt worden, die die zeitliche Eingrenzung der Kalama-Ausbruchsphase auf etwa 300-600 Jahre vor heute ermöglichten (CRANDELL 1987, 70).

FRITZ (1980b) beschreibt den Transport und die Ablagerung von Baumstümpfen, deren Wurzelgeflecht z.T. noch erhalten ist. Bei den Baumstümpfen handelt es sich einerseits um die Reste von bei der Explosion abgerissenen Stämmen, es finden sich aber auch von Holzfällern abgesägte Stücke. Die charakteristische Form der Stümpfe mit dem nach unten breiter werdenden Wurzelansatz hat sie in den Schutt- und Schlammfluten regelrecht „schwimmen" lassen. Nur selten wird in der Literatur auf überkippte Baumstümpfe hingewiesen (FRITZ 1980b), Transport und Ablagerung in der ursprünglichen Position scheinen die Regel zu sein. Im Randbereich der Schlammströme wurden Baumstümpfe und treibende Stämme neben fest verwurzelten Bäumen abgesetzt. Hierin sieht FRITZ eine Analogie zu einem Teil des „versteinerten Waldes" (in Ablagerungsgesteinen eingebettete, inzwischen versteinerte Baumstämme) im Yellowstone Nationalpark, für den er nur kurz zuvor (FRITZ 1980a) eine fluviatil-sedimentäre Entstehung nachgewiesen hat (siehe auch KAROWE & JEFFERSON 1987).

Schlammströme

Die größten Schäden entstanden durch die ausgelösten Schlammströme, die sich durch mehrere Flußsysteme wälzten; zahlreiche bereits gefällte oder durch den Ausbruch entwurzelte Baumstämme wurden mitgerissen, Brücken zerstört und Flußtäler verstopft (Abb. 7). Genaugenommen ist „Schlammstrom" ein mehr populärer Begriff, der anschaulich die schlammigen („matschigen") Massen unterschiedlicher Entstehung beschreibt; ein mögliches Kriterium für diese Bezeichnung ist der prozentuale Anteil von Ton, der über 25 % betragen sollte. Bei den Schlammströmen am Mount St. Helens handelt es sich dagegen um sog. Lahare, die nach weiter gefaßter Definition Schuttströme im Zusammenhang mit vulkanischen Erscheinungen sind. Meist enthalten sie auch vulkanisches Material, d. h. mitgerissene Gesteinsbrocken. Wegen der Vielfalt möglicher Erscheinungen lassen sich zur Zeit keine klar trennenden Begriffe anwenden (SCOTT 1988).

Detaillierten Untersuchungen zufolge finden sich um den Vulkan die Ablagerungen von mindestens 35 Laharen aus den verschiedensten Eruptionsphasen; durch die abtragende Tätigkeit der Ströme wurden auch Anschnitte von älteren Ablagerungen freigelegt (SCOTT 1988). Zumindest ein früherer Lahar war um rund eine Größenordnung stärker als die jüngsten Ströme im Mai 1980 und März 1982. Dennoch ist das Ausmaß der jüngsten Schlammfluten beträchtlich: Sie reichten bis zur Mündung des Cowlitz River in den Columbia River, das ist eine Entfernung von etwa 100 km zum Vulkan. Die geschätzte Geschwindigkeit des South Fork-Lahar betrug im Oberlauf ca. 30 m/sec, am Zusammenfluß mit dem North Fork-Lahar noch 10 m/sec. Letztgenannter folgte dem Flußbett mit 6-12 m/sec; im North Fork Toutle River wurde eine so große Menge Schutt abgelagert, daß die Entwässerung nahezu unterbunden war.

Abb. 6: Blick vom Nordhang des Vulkans Richtung Nordosten. Die Erosionskraft von Schlammströmen hat in den Schuttablagerungen vor dem Vulkankegel kleine Canyons geformt. Im Hintergrund ist der Spirit Lake zu sehen, der teilweise noch von einer Matte schwimmender Baumstämme (links) bedeckt ist. (Foto: Martin ERNST)

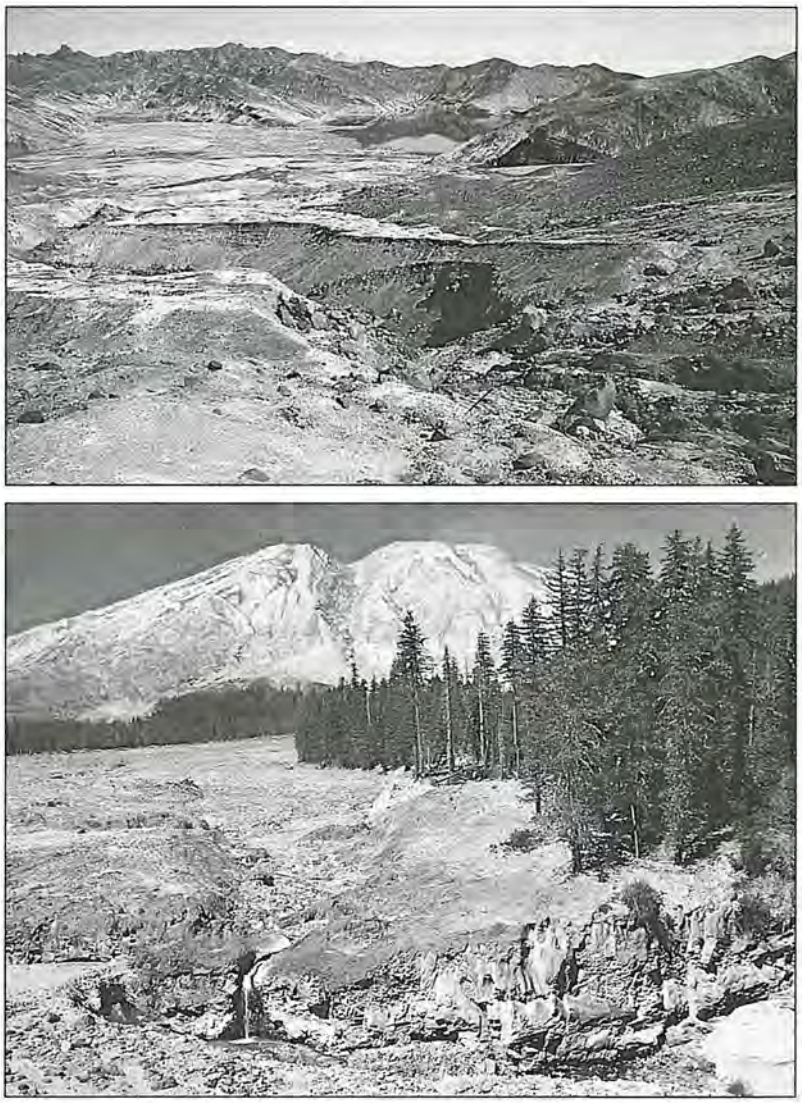


Abb. 7: Schlammströme entwickelten sich auch auf der von der Explosion abgewandten Seite des Vulkans. Im Bild sind die Ablagerungen eines Schlammstroms auf der Südostseite des Vulkans zu sehen. Baumstämme auf dieser Seite des Berges wurden zwar vom Schlammstrom mitgerissen, aber nicht durch den Vulkanausbruch geschädigt. (Foto: U.S.D.A. Forest Service photo)

Abb. 8: Auf der Nordostseite des Spirit Lake ist die Wasserstandsmarke der Flutwelle auch im Jahr 1992 noch deutlich zu erkennen. Nicht nur der Boden und die Vegetationsdecke wurden mitgerissen, auch das anstehende Gestein wurde erodiert; der Untergrund weist Schrammen auf, wie sie in ähnlicher Weise auch von Gletschern erzeugt werden. (Foto: Martin ERNST)

Als Ursache der Entstehung der Schlammfluten werden die von der Schuttlawine mitgeführten Eis- und Schneemassen angesehen, durch deren Schmelzen sich die gesamte Schuttmasse zunehmend verflüssigte. Die Wucht, mit der der Schutt in den Oberlauf der Flußsysteme stürzte, die im Flußtal mitgerissenen Lockermassen und das in den Flüssen mitgeführte Wasser trugen zur Dynamik der Schlammströme bei. Die Temperaturen des Schlamms wurden auf 50-250°C geschätzt, doch legen die geringen Schäden an organischem Material eine Temperatur von unter 100°C nahe.

Der Schlammstrom vom 19. März 1982 erreichte fast noch einmal die Dimension der Ströme vom Mai 1980. Ein Ausbruch des Vulkans löste eine Schutt- und Eislawine aus, die eine Strecke von bis zu 8,4 km zurücklegte (WAITT et al. 1983). Durch das rasche Schmelzen von Eis und Schnee im Krater und an den Berghängen entstand im Krater ein See. Das Wasser brach plötzlich aus dem Kraterbecken aus und flutete den Hang hinab. Die Flutwelle vermischte sich mit lockerem Schutt und entwickelte sich schließlich zu einem Schlammstrom, der größtenteils dem Tal des Toutle River folgte. Das Fassungsvermögen des Flußbetts war gering, so daß der Höchststand der Schlammfluten aus dem Jahr 1980 nur um wenige Meter verfehlt wurde. Im Cowlitz River, 84 km vom Krater entfernt, stieg der Wasserpegel nur noch um 25 cm. Durch die Lawine und den Schlammstrom haben sich die topographischen Verhältnisse am Fuß des Vulkans verändert, z.T. entstanden neue Ablagerungen, an anderen Stellen wurden die Ablagerungen aus dem Jahr 1980 weggerissen (Abb. 6 und 7). Ebenfalls auf Schlammströme werden die faszinierenden Abtragungsstrukturen vor dem Vulkan und im Tal des Toutle River zurückgeführt: Die Schutt- und Aschemassen werden von steilen, über 30 m tiefen Schluchten durchzogen, durch die heute kleine Flüsse strömen. Diese Landschaft wird von zahlreichen Einheimischen und Forschern als der „Little Grand Canyon" bezeichnet.

Datierung

Frühere Ausbruchsphasen lassen sich durch die Radiokarbon-Methode und die Baumring-Analyse recht gut eingrenzen. VOLPE & HAMMOND (1991) haben sowohl älteres vulkanisches Material als auch jüngst gefördertes Magma auf den Gehalt an Nukliden aus der Uran-Zerfallsreihe untersucht. Da es sich bei dem Vulkan um ein offenes System handelt – Zerfallsprodukte können weggeführt werden oder sich in Teilen der Schmelze bevorzugt konzentrieren – messen sie den resultierenden Alterswerten eine geringere Aussagekraft bei und ziehen die Interpretation der Isotopenverhältnisse zur Beschreibung magmatischer Prozesse vor.

Trotz aller Einschränkungen bleibt festzuhalten, daß die gemessenen Isotopenverhältnisse insofern im Trend liegen, als sie Alter von weniger als 50.000 Jahren anzeigen. Die Radium-Thorium-Alter nehmen mit einer Ausnahme gemäß der geologischen Folge mit wachsendem Alter zu. Die Thorium-Uran-Alter wurden aus Isochronen-Diagrammen gewonnen; da die Steigung der Geraden extrem flach verläuft (nach der Geradengleichung entspricht die Steigung dem Alter), ist der Fehler groß. Der in den 80er Jahren geförderte Dazit innerhalb des Kraters liefert einen Alterswert von 6.000 $\pm$ 4.000 Jahren. Das erscheint plausibel, denn die Isotopenverhältnisse haben sich nicht erst beim Ausbruch eingestellt, sondern in dem zähen Magma waren schon Kristalle vorhanden; demnach zeigen die berechneten Alter nicht den Zeitpunkt des Vulkanausbruchs, sondern den der Kristallisation des einst in den Vulkanbau vorstoßenden Magmas an. Schwieriger zu deuten sind die hohen Alter von Andesit und Basalt aus der Castle-Creek-Eruptionsperiode (1.700-2.200 Jahre vor heute). Mit rund 30.000 Jahren sind sie deutlich zu hoch; möglicherweise liegt hier eine Vermischung mit älterem Material vor.

Abb. 9: Von der Flutwelle wurden Baumstämme mitgerissen und in die Schuttmassen einsedimentiert. Ein Teil des Schutts blieb an der Nordostseite des Spirit Lake liegen, das übrige Material wurde wieder in den Spirit Lake zurückgeschwemmt. (Foto: Martin ERNST)

Weitere Beobachtungen

Teile der Landschaft um den Mount St. Helens stehen heute unter Naturschutz; man überläßt die Natur sich selbst und hat dadurch die Möglichkeit, die Regeneration einer Landschaft nach einer geologischen Katastrophe zu studieren (Abb. 10). Zu den weiteren Besonderheiten im Anschluß an die Schuttlawinen, pyroklastischen Ströme und Schlammströme zählen neu entstandene Seen hinter Schuttwällen (Coldwater Lake und Castle Lake) und die Abtragungsstrukturen an den Hängen um den Spirit Lake – eine gewaltige Wasserwelle war bis zu 260 m hochgeschwappt und hatte die Hänge bis auf den Untergrund erodiert (Abb. 8 und 9). An einigen Berghängen sind Rillen und Wellen im Fels zu beobachten, die mehrere hundert Meter lang sein können und durchschnittliche Wellenlängen von etwa 5 m aufweisen. Diese Furchen hat man erst einige Jahre nach dem Ausbruch entdeckt, nachdem die Ascheschicht von den kleinen Erhebungen in die Rillen gespült worden war; dadurch entstand ein Farbkontrast, wodurch diese Strukturen bei der Auswertung von Luftbildern auffielen (KIEFER & STURTEVANT 1988).

Ausblick

Angesichts der Bündelung geologisch relevanter Ereignisse und Folgeerscheinungen während der jüngsten Ausbruchsphase des Mount St. Helens mag es zunächst überraschen, wenn die an den Forschungen beteiligten Vulkanologen meinten, nichts prinzipiell Neues oder Unerwartetes festzustellen: alle Phänomene waren von anderen Ausbrüchen her bekannt oder konnten an den Auswirkungen historischer Vulkanexplosionen noch abgelesen werden. Unterschätzt wurde lediglich die Wucht der einige Minuten dauernden seitlichen Eruption; die Sicherheitszone nördlich des Vulkans war immer noch zu knapp bemessen. Trotzdem war der Ausbruch für die Wissenschaftler von außerordentlichem Wert: nie zuvor war es möglich, innerhalb eines begrenzten und relativ leicht zugänglichen Areals eine Vulkankatastrophe so gut zu dokumentieren. Die Natur hat ein „Labor" eingerichtet, in dem in rascher Folge und interessantem Wechselspiel heftige geologische Prozesse ablaufen.

Dabei drängt sich die Frage auf, wie die Beobachtungen am Mount St. Helens (gemäß dem Aktualismus-Prinzip) auf frühere Vulkanausbrüche und ihre Folgen zu übertragen sind – allein während der letzten Jahrhunderte gab es weitaus größere Vulkankatastrophen. Im Moment ist es sicherlich noch zu früh, um eine detaillierte Analyse zu erwarten. Vorläufig bleibt festzuhalten, daß kurzfristige, ruckartige Ereignisse zu ähnlichen Phänomenen führen können, wie die zeitlich akkumulierten Wirkungen langsamer Prozesse. Das Tal des Toutle River ist

Abb. 10: Wiederbesiedlung in der verwüsteten Landschaft, hier am Meta Lake im August 1992. Beim Ausbruch wurden Sämlinge von Koniferen unter mitgerissenem Eis oder Schnee begraben und konnten so im Boden überleben; heute sind die Bäume bereits über 3 m hoch. Pionierpflanzen haben die Landschaft erobert, auch Tiere haben sich in neuen Lebensräumen ausgebreitet. (Foto: Martin ERNST)

dafür ein gutes Beispiel: Ein Schlammstrom hat kleine Schluchten und Täler in die Schuttmassen gerissen, so daß darin heute Bäche fließen. Wie bereits im Prolog erörtert, kann eine Wirkung (Fluß strömt durch eine Schlucht) verschiedene Ursachen haben. Der Fluß kann sich im Verlauf langwieriger Abtragungsprozesse in sein Tal gegraben haben, er kann sich aber auch einem bereits vorgezeichneten Relief angepaßt haben – drastisch gesprochen: Erst das Tal, dann der Fluß.

Das gewählte Beispiel beinhaltet übrigens noch ein pikantes Detail: Hätte man der Natur freien Lauf gelassen, wäre der Spirit Lake vermutlich ausgebrochen; eine Flut- und Schuttlawine hätte sich ins Tal des Toutle River ergossen und die Landschaftsformen erneut verändert. Durch den Tunnel wurde der Seespiegel jedoch gesenkt und der Druck auf den Schuttdamm verringert. Damit hat der Mensch den natürlichen Lauf der Dinge unterbrochen und die insgesamt um den Vulkan ablaufenden Vorgänge an einer wichtigen Stelle regelrecht angehalten, eine Momentaufnahme konserviert. Die Schutzmaßnahmen waren ohne Zweifel erforderlich; für den Geowissenschaftler aber, der im Rahmen des Aktualismus-Prinzips forscht, sind die menschlichen Eingriffe ein nicht zu vernachlässigender Störfaktor!

Ob der Mount St. Helens in den nächsten Jahrzehnten schweigen wird, kann heute niemand mit Sicherheit sagen. Immerhin haben sich die früheren Ausbruchsphasen über einen längeren Zeitraum hingezogen, jeweils unterbrochen von einigen Jahren der Ruhe. Auf ein erneutes Aufleben der vulkanischen Aktivität sind die Vulkanologen vorbereitet: Schließlich war – und ist - der Mount St. Helens der gefährlichste Vulkan im Kaskadengebirge.

Dank

Bei Michael KOTULLA, Dr. Martin ERNST und Dr. Reinhard JUNKER möchte ich mich ganz herzlich für wertvolle Anregungen und kritische Diskussionen bedanken.

Literatur

Austin SA (1991) Mount St. Helens: A slide collection for Educators. Geological Education Materials, ICR, El Cajon.

Christiansen RL & Peterson DW (1981) Chronology of the 1980 eruptive activity. US Geological Survey Professional Paper *1250*, 17-30.

Coffin HG (1983) Erect floating stumps in Spirit Lake, Washington. Geology *11*, 298-299.

Coffin HG (1987) Sonar and scuba survey of a submerged allochthonous „forest" in Spirit Lake, Washington. Palaios *2*, 178-180.

Crandell DR (1987) Deposits of pre-1980 pyroclastic flows and lahars from Mount St. Helens volcano, Washington. US Geological Survey Professional Paper *1444*, Washington.

Crandell DR, Mullineaux DR & Rubin M (1975) Mount St. Helens volcano: recent and future behavior. Science *187*, 438-441.

Criswell CW (1987) Chronology and pyroclastic stratigraphy of the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington. J. Geophys. Res. *92*, 10237-10266.

Decker R & Decker B (1981) Die Ausbrüche des Mount St. Helens. Spektrum der Wissenschaft (Mai), S. 32-46.

Foxworthy BL & Hill M (1982) Volcanic eruptions of 1980 at Mount St. Helens. The first 100 days. US Geological Survey Professional Paper *1249*, Washington.

Fritz WJ (1980a) Reinterpretation of the depositional environment of the Yellowstone „fossil forests". Geology *8*, 309-313.

Fritz WJ (1980b) Stumps transported and deposited upright by Mount St. Helens mud flows. Geology *8*, 586-588.

Hughes JM, Stoiber RE & Carr MJ (1980) Segmentation of the Cascade volcanic chain. Geology *8*, 15-17.

Karowe AL & Jefferson TH (1987) Burial of trees by eruptions of Mount St Helens, Washington: implications for the interpretation of fossil forests. Geol. Mag. *124*, 191-204.

Kiefer SW & Sturtevant B (1988) Erosional furrows formed during the lateral blast at Mount St. Helens, May 18, 1980. J. Geophys. Res. *93*, 14793-14816.

Larson D (1993) The recovery of Spirit Lake. American Scientist *81*, 166-177.

Lipman PW & Mullineaux DR (eds, 1981) The eruptions of Mount St. Helens, Washington. US Geological Survey Professional Paper *1250*, Washington.

Moore JG & Sisson TW (1981) Deposits and effects of the May 18 pyroclastic surge. US Geological Survey Professional Paper *1250*, 421-438.

Papale P & Dobran F (1994) Magma flow along the volcanic conduit during the Plinian and pyroclastic flow phases of the May 18, 1980, Mount St. Helens eruption. J. Geophys. Res. *99*, 4355-4373.

Rosenbaum JG & Waitt RB (1981) Summary of eyewitness accounts of the May 18 eruption. US Geological Survey Professional Paper *1250*, 53-67.

Schmincke H-U (1986) Vulkanismus. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

Scott KM (1988): Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system. US Geological Survey Professional Paper *1447-A*, Washington.

Smith DR & Leeman WP (1993) The origin of Mount St. Helens andesites. J. Volcanol. Geotherm. Res. *55*, 271-303.

Tucker ME (1985) Einführung in die Sedimentpetrologie. Enke, Stuttgart.

Volpe AM & Hammond PE (1991) ^{238}U-^{230}Th-^{226}Ra disequilibrium in young Mount St. Helens rocks: time constraint for magma formation and crystallization. Earth Plan. Sci. Lett. *107*, 475-486.

Waitt RB, Pierson TC, MacLeod NS, Janda RJ, Voight B & Holcomb RT (1983) Eruption-triggered avalanche, flood, and lahar at Mount St. Helens – effects of winter snowpack. Science *221*, 1394-1397.

Walker GPL & McBroome LA (1983) Mount St. Helens 1980 and Mount Pelée 1902 – Flow or surge? Geology *11*, 571-574.

Berichte im Nachrichtenmagazin TIME vom 2. 6., 9. 6. und 22. 9. 1980.

Strategien und mikroevolutionäre Entwicklungen des Zugverhaltens von Singvögeln

André-Alexander Weller, Kupferbergstraße 41, 67292 Kirchheimbolanden

Zusammenfassung: **In den vergangenen Jahren führten umfangreiche Untersuchungen zum Vogelzug zu neuen Erkenntnissen über allgemeine und artspezifische Strategien und deren Ursachen bei verschiedenen Singvögeln. Studien an Mönchsgrasmücken *(Sylvia atricapilla)* haben beispielsweise gezeigt, daß das Orientierungsverhalten stark von Genen beeinflußt wird, welche offensichtlich die Zugrichtung, aber auch die Zugaktivität zu bestimmen scheinen. Obwohl diese Ergebnisse teilweise widersprüchlich gedeutet werden, weisen sie auf mikroevolutionäre Entwicklungen im Zuggeschehen hin. Sie könnten Teilpopulationen bestimmter Arten erlauben, in relativ kurzer Zeit auf Umweltveränderungen zu reagieren bzw. günstigere Flugrouten und Überwinterungsorte auszuwählen.**

Wie nur wenige andere Vertreter des Tierreichs sind die Vögel aufgrund ihrer morphologischen

Anpassung befähigt, negativen Veränderungen in ihrer Umwelt rasch auszuweichen und Regionen mit günstigeren Lebensbedingungen aufzusuchen. Mit diesem für die einzelne Art mit Vorteilen, für das Individuum aber mit Risiken verbundenen Phänomen des Vogelzuges (Migration) beschäftigt sich heute vor allem die sog. Ursachenforschung (vgl. CREUTZ 1989). Die Interpretationsansätze sind hierbei verschieden. Sie beinhalten sowohl generelle Fragen nach der Evolution des Zuggeschehens als auch die Untersuchung von Teilaspekten, z.B. des Einflusses von steuernden Faktoren. Die Problematik, daraus allgemein gültige Theorien abzuleiten, wird exemplarisch an der Frage nach dem Auslöser für das Zugverhalten ersichtlich. So scheint unter den klimatischen Gegebenheiten in Gebieten mit starken jahreszeitlichen Schwankungen der Änderung der Tageslänge eine entscheidende Bedeutung zuzukommen. Andererseits ist bekannt, daß auch unter tropischen, weniger extremen Bedingungen Vogelzug in beträchtlichem Maße stattfindet (CURRY-LINDAHL 1981).

Entwicklung der Zugsysteme

Für die Entwicklung der Zugsysteme im eurasischen Raum ziehen einige Autoren vor allem die eiszeitliche Klimaverschlechterung in Betracht, die eine reversible Verdrängung von weiter nördlich lebenden Populationen zur Folge hatte (u.a. BERTHOLD 1990). Demnach wurden ehemalige Verbreitungsgebiete nach dem Rückzug des Eises z.T. über gleiche Routen, auf denen sie verlassen wurden, wiederbesiedelt. Dies könnte heutige, umständlich erscheinende Zugwege wie bei den iberischen Neuntötern *(Lanius collurio)* erklären (BIEBACH et al. 1983). Außerdem erfolgte eine Brutgebietserweiterung von eisfrei gebliebenen Rückzugsgebieten aus, wo es zudem unter den Bedingungen räumlicher Isolation von Teilen gleicher Populationen auch zur Aufspaltung in Zwillingsarten (Fitis und Zilpzalp, Garten- und Waldbaumläufer u.a.) kam. Vergleichbare rezente Entwicklungen führten, teilweise unter anthropogenem Einfluß, in jüngerer Vergangenheit sowohl zur Eroberung neuer Brutareale (z.B. Girlitz, Karmingimpel, Orpheusspötter, Türkentaube) als auch zur Verlagerung von Ruhezielen. Was die zweitgenannte Beobachtung betrifft, wurde in den letzten Jahren für eine Reihe von Singvögeln die genetische Determination des Migrationsverhaltens nachgewiesen, die populationsintern zu rasch sich etablierenden Zugmustern führen kann. Am Beispiel der Mönchsgrasmücke *(Sylvia atricapilla,* Abb. 1) sollen in diesem Zusammenhang zwei Aspekte näher betrachtet werden: Zugaktivität und Orientierungsverhalten. Diese Vogelart hat sich in mancher Hinsicht als geeignetes Untersuchungsobjekt der ornithologischen Forschung erwiesen, da sie u.a. in Gefangenschaft leicht zu halten als auch problemlos nachzuzüchten ist. Als Brutvogel bewohnt die Mönchsgrasmücke die westliche Paläarktis. Ihr Verbreitungsgebiet reicht von den Britischen Inseln im Westen über Teile Skandinaviens ostwärts bis nach Sibirien; im Süden verläuft die Grenze vom nordwestlichsten Afrika über die Türkei bis in den Iran. Entsprechend der Vielgestaltigkeit der besiedelten Lebensräume zeigt die Art ein breites Spektrum von Verhaltensanpassungen, beispielsweise hinsichtlich der Zugmuster. Auf den Kapverden und einigen Mittelmeerinseln haben sich eigene Rassen entwickelt und zum Teil zu Standvögeln etabliert, während der überwiegende Teil der zentraleuropäischen Populationen aus Kurz- bis Weitstreckenziehern besteht. Individuen aus dem westeuropäischen Raum überwintern vor allem an den Mittelmeerküsten und im westlichen Afrika, osteuropäische Vögel hingegen in Ostafrika, was mit der Kanalisierung der Zugwege über der Straße von Gibraltar und dem Bosporus zusammenhängt. Im Mittelmeerraum existieren schließlich teilziehende Populationen, also Mischpopulationen aus Ziehern und Standvögeln.

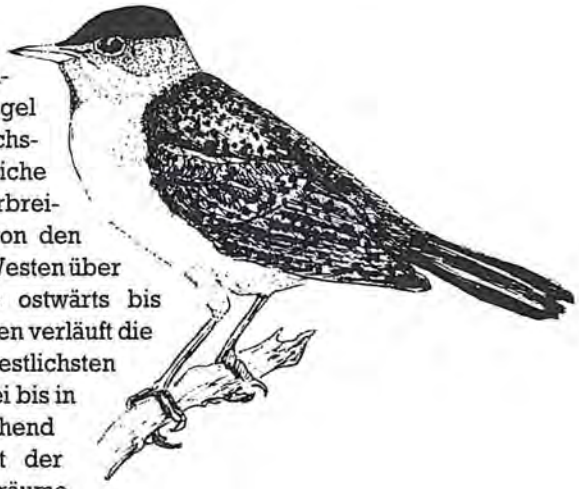


Abb. 1: Männchen der Mönchsgrasmücke (Sylvia atricapilla) *(Zeichnung: Friedemann BECK)*

Änderungen des Zugverhaltens

An der Vogelwarte Radolfzell wurden umfangreiche populationsgenetische Studien zur Untersuchung der Zugaktivität anhand der Steuerung des Teilzugverhaltens durchgeführt (z.B. BERTHOLD et al. 1990). Entsprechende Experimente an südfranzösischen Vertretern ergaben, daß sich bei selektivem Brüten von zugaktiven bzw. nichtziehenden Individuen bereits nach wenigen Generationen (Elterngeneration: 75% Zieher) deutlich die Anteile der Nachkommen unterschieden (Abb. 2). Eine adäquate Situation, wie sie im Versuch durch assortatives Verpaaren (gezieltes Verpaaren, hier der Zieher bzw. Nichtzieher untereinander) simuliert wurde, könnte im Freiland das Auftreten von Selektionsfaktoren darstellen. Denkbar wäre dies z.B. im Fall eines plötzlichen Kälteeinbruchs, der die überwinternde Standvogelpopulation auslöschen, ziehende Artgenossen aber begünstigen würde; letztere würden sich dann zwangsläufig selektiv verpaaren. Dabei wäre eine sehr rasche Änderung des Zugverhaltens innerhalb weniger Generationen zu erwarten.

Aktuelle Studien zum Orientierungsverhalten befassen sich u.a. mit dem erst seit den sechziger

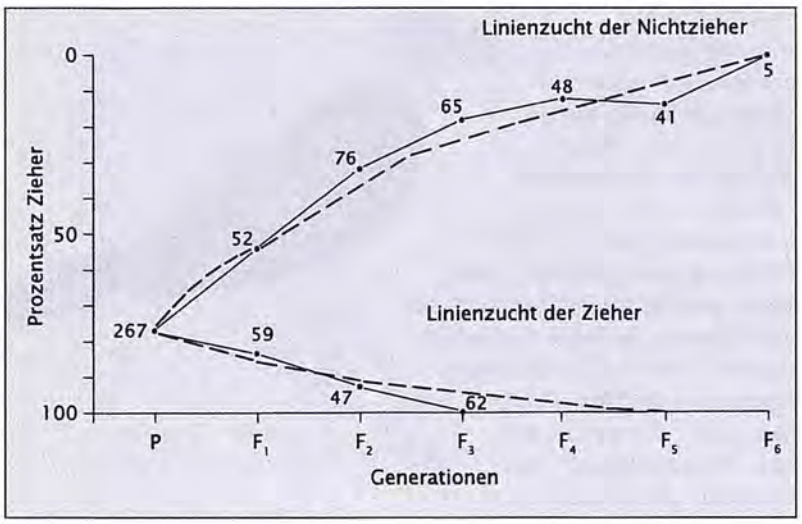


Abb. 2: Zweiweg-Selektion mit teilziehenden französischen Mönchsgrasmücken. Zucht bis F_6 (Nichtzieher) bzw. F_3 (Zieher). Zahlen: Anzahl der Individuen pro Generation. Gestrichelte Linien: an die Selektionserfolge am besten angepaßte mathematische Funktionen. (Nach BERTHOLD et al. 1990)

Jahren zu beobachtenden und in jüngster Zeit expandierenden Nordwestzug mitteleuropäischer Mönchsgrasmücken auf die Britischen Inseln (LEACH 1981) sowie vereinzelt auch nach Südskandinavien. Wie die Auswertung von Ringfunden ergab, stammen diese Individuen überwiegend aus einem Gebiet, das sich von den Benelux-Staaten bis Österreich erstreckt (ZINK 1973, SCHLENKER 1981). Mittlerweile bevorzugt ungefähr ein Zehntel der in Mittel- und Süddeutschland ansässigen Population das neue Winterquartier. Um festzustellen, inwieweit möglicherweise genetische Faktoren die Richtungswahl beeinflussen, wurden Mönchsgrasmücken in England gefangen und anschließend selektiv verpaart (BERTHOLD et al. 1992). Handelte es sich – ungeachtet der auffälligen quantitativen Zunahme – um eine eher zufällige Migrationsbewegung, so würden sich die Nachkommen in ihrem Orientierungsverhalten von den Eltern mehr oder weniger unterscheiden und verstärkt herkömmliche Richtungspräferenzen (SW-Ausrichtung) zeigen. Falls sich das Merkmal „Nordwestzug" dagegen bei der Elterngeneration genetisch etabliert hätte, würde es an die Jungvögel direkt vererbt werden. Die Versuchsergebnisse untermauern die zweite Hypothese: die neue Route wird offenbar bereits im Erbgut der F_1-Generation vorprogrammiert (Abb. 3). Obwohl die bisherigen Vorstellungen, wie die Navigation in die nordwestlichen Winterquartiere überhaupt erfolgt, umstritten sind – denkbar wäre neben einer geringen Abweichung über den bisherigen Zugwinkel hinaus (Fächerzug, Abb. 4) auch eine (fehlgesteuerte) Umkehrung der eigentlichen Zugrichtung (reverse migration model, BUSSE 1992) – so scheint dieses Verhalten den Individuen doch eher Selektionsvorteile zu bringen. Aufgrund des rascheren Übergangs vom Kurz- in den Langtag in nördlicheren Breiten kommen sie im Frühjahr eher in Zugdisposition und erlangen früher den reproduktiven Status als Vögel aus den traditionellen Überwinterungsgebieten (Mittelmeerraum). In Verbindung mit der um ein Drittel kürzeren Flugstrecke sind diese Individuen somit in der Lage, die besten Brutreviere zuerst zu besetzen. Ein weiterer möglicher Vorteil könnte die bessere physiologische Akklimatisierung an die heimatlichen Witterungsbedingungen, insbesondere an Nachwintereinbrüche, sein. Innerhalb weniger Jahrzehnte konnte sich somit bei der Mönchsgrasmücke eine Änderung des Migrationsverhaltens

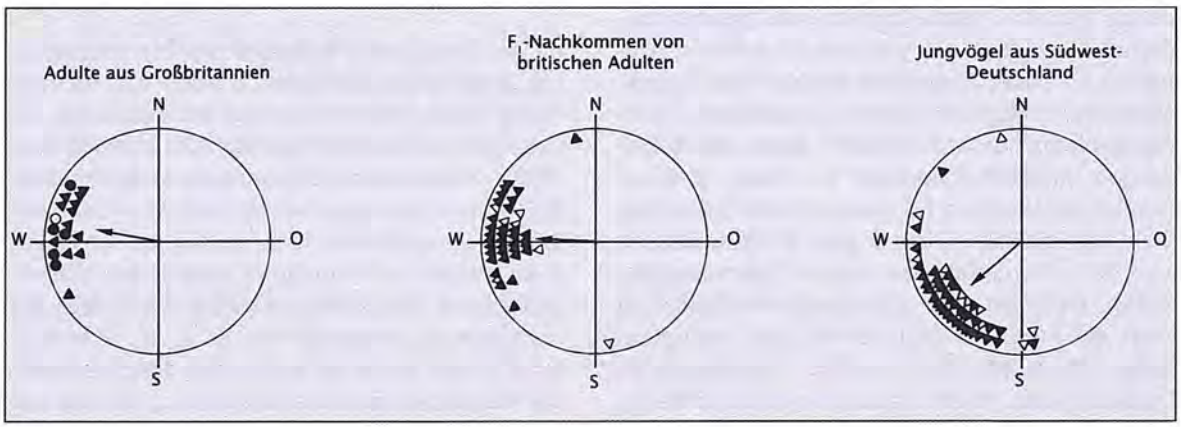


Abb. 3: Orientierung gefangener britischer Mönchsgrasmücken („Adulte") und ihrer Nachkommen („F_1-Nachkommen") gegenüber einer Kontrollgruppe handaufgezogener südwestdeutscher Vögel („Jungvögel") in Radolfzell. Allg. Symbol: Hauptrichtung eines Vogels in 15-20 Tests im Orientierungskäfig (gefüllt: $P<0.05$, offen: $P>0.05$, Rayleigh-Test). P entspricht der statistischen Wahrscheinlichkeit, daß das Individuum die experimentell ermittelte Richtung tatsächlich bevorzugen würde ($P<0,05$) oder nicht (d. h. Mittelwert wäre nur zufällig, $P>0,05$). Dreiecke bei „Adulte": Elternvögel von F_1-Nachkommen, Kreise: Vögel ohne Reproduktionserfolg bezüglich F_1. Pfeile: Hauptvektoren je Versuchsgruppe. (Nach BERTHOLD et al. 1992)

Die Tests erfolgten im sog. „Emlen-Käfig". Hierzu belegt man den Boden der trichterförmig ausgestalteten, nach oben plexiverglasten Käfige mit Korrekturpapier und stellt diese nachts an einem ruhigen Ort im Freien auf. Die Vögel, die sich nur anhand des Himmelsausschnitts orientieren können, hinterlassen bevorzugt in dem Sektor Kratzspuren, der ihrer angeborenen Zugrichtung entspricht. Mittels eines Photodetektors können selbst kleinste Kratzer aufgespürt und direkt in den Computer eingelesen werden. Führt man Kreuzungsversuche mit Vertretern verschieden migrierender Populationen durch und testet die Nachkommen, erhält man auf diese Weise Aufschluß über deren phänotypisches Verhalten.

durch mikroevolutive Prozesse herauskristallisieren, die Teilen einer bestimmten Population einen allgemeinen Fitneßgewinn einbringt. Dies stellt den bislang schnellsten nachgewiesenen Fall von Verhaltensanpassungen bei Wirbeltieren dar.

Die Änderung des Zugverhaltens stellt den bislang schnellsten nachgewiesenen Fall von Verhaltensanpassungen bei Wirbeltieren dar.

Die Untersuchung der sehr komplexen Steuerung von für das Individuum bedeutsamen Verhaltensvorgängen wie der Migration im allgemeinen und Teilzug im besonderen bedarf aber weiterer Feldforschungen und Simulationsexperimente, um noch ungeklärte grundlegende Fragen nach den dabei involvierten Mechanismen beantworten zu können.

Literatur

BERTHOLD P (1990) Vogelzug. Darmstadt, Wiss. Buchgesellschaft.

BERTHOLD P & TERRILL SB (1988) Migratory behaviour and population growth of Blackcaps wintering in Britain. Ring. & Migr. *9*, 153-159.

BERTHOLD P, MOHR G & QUERNER U (1990) Steuerung und potentielle Evolutionsgeschwindigkeit des obligaten Teilzieherverhaltens: Ergebnisse eines Zweiweg-Selektionsexperiments mit der Mönchsgrasmücke *(Sylvia atricapilla)*. J. Orn. *131*, 33-45.

BERTHOLD P, HELBIG AJ, MOHR G & QUERNER U (1992) Rapid microevolution of migratory behaviour in a wild bird species. Nature *360*, 668-670.

BIEBACH H, DALLMANN M, SCHUY W & SIEBENROCK K-H (1983) Die Herbstzugrichtung von Neuntötern *(Lanius collurio)* auf Karpathos (Griechenland). J. Orn. *124*, 251-257.

BUSSE P (1992) Migratory behaviour of Blackcaps *(Sylvia atricapilla)* wintering in Britain and Ireland: contradictory hypotheses. Ring & Migr. *14*, 1-2, 51-75.

CREUTZ G (1989) Geheimnisse des Vogelzuges. N. Brehm-Büch. 75, Wittenberg.

CURRY-LINDAHL K (1981): Bird Migration in Africa. Vol. 1-2, London, N.Y.

LEACH IH (1981) Wintering Blackcaps in Britain and Ireland. Bird Study *28*, 5-14.

SCHLENKER R (1981) Verlagerung der Zugwege von Teilen der südwestdeutschen und österreichischen Mönchsgrasmücken *(Sylvia atricapilla)*-Population. Ökol. Vögel *3*, 314-318.

ZINK G (1973) Der Zug europäischer Singvögel. Ein Atlas der Wiederfunde beringter Vögel. Bd. 1, Möggingen, Vogelzug-Verlag.

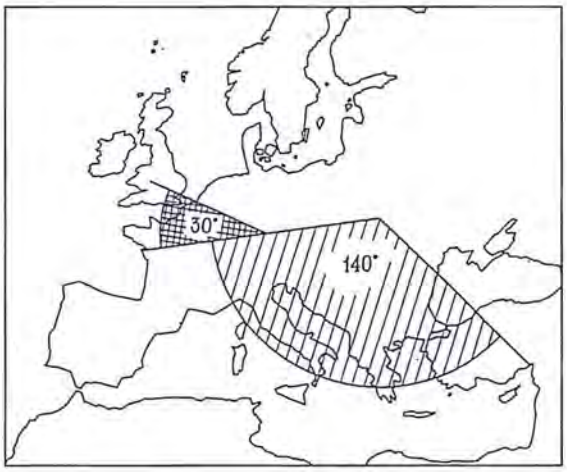


Abb. 4: Zugwinkel kontinentaler europäischer Mönchsgrasmücken. Gestrichelt: „Normaler" Zugwinkel (nach ZINK 1973), kariert: denkbare Abweichung an der westlichen Zuggrenze, die den Vögeln das Erreichen der Britischen Inseln ermöglicht. (Nach BERTHOLD & TERRILL 1988)

Die Familie der Bromeliaceae – ein oder mehrere Grundtypen?

Klaus Neuhaus, Lotzstr. 54, D-65934 Frankfurt a.M.

Zusammenfassung: **Die Bromeliaceae sind eine einheitliche Pflanzenfamilie, die sich z.B. durch besondere Saugschuppen auszeichnet. Daher hat sich die Frage gestellt, ob es sich hierbei um einen Grundtyp handeln könnte. Bisher sind jedoch zwischen den Unterfamilien keine Kreuzungen bekannt und die Unterfamilien sind hinsichtlich des Frucht- und Samenbaus deutlich verschieden. Möglicherweise bilden also die drei Unterfamilien je einen Grundtyp, obwohl sich morphologische, anatomische und ökologische Merkmale stark überschneiden.**

Übersicht über die Familie der Bromeliaceae

Die Bromelien, Ananasgewächse, bilden im Pflanzenreich eine relativ geschlossene Gruppe, und die meisten Bromelien lassen sich an ihrem typischen Wuchs gut erkennen. Bei der einzigen Familie innerhalb der Ordnung Bromeliales (Unterklasse Liliidae, Klasse Monocotyledoneae) handelt es sich um schmalblättrige Rosettenpflanzen der amerikanischen Tropen. Der Rosettendurchmesser kann einige mm bis zu 2m betragen. Die Blüten werden teilweise von Vögeln bestäubt und sind in der für

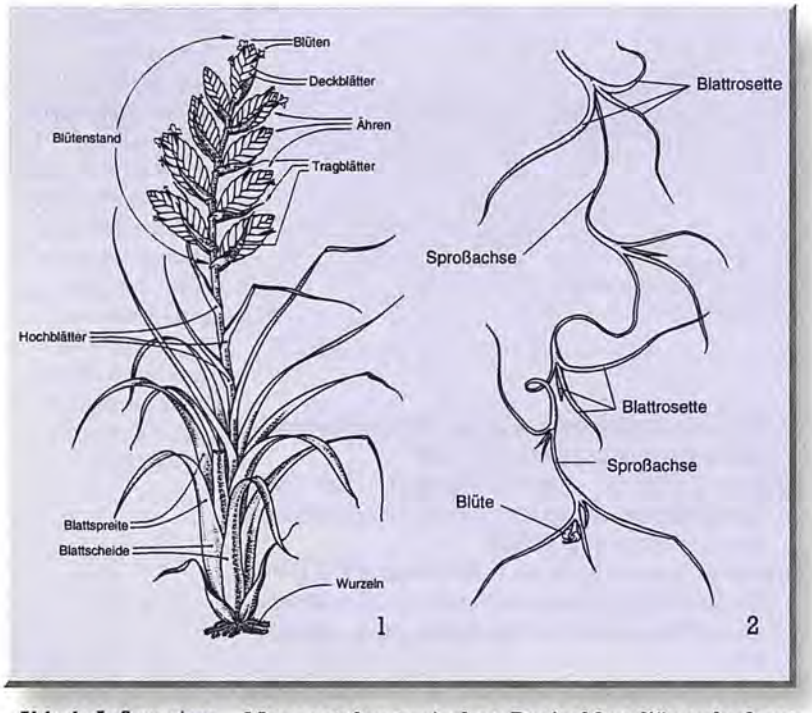


Abb. 1: Aufbau einer Bromelie am Beispiel einer Tillandsia. *(1/3 natürliche Größe, nach* LEHMANN *1986, verändert)*

Abb. 2: Tillandsia usneoides *(3/4 natürliche Größe, nach* RAUH *1990, verändert)*

Monocotylen typischen Dreizahl radiär aufgebaut: Auf drei Kelchblätter folgen drei Blütenblätter mit zweimal drei Staubblättern und wieder drei Fruchtblättern. Nicht selten sitzen die Blüten in Ähren und werden von Deckblättern umhüllt. (Abb. 1 zeigt einen typischen Habitus).

Es gibt aber auch zum Teil extreme Abweichungen vom typischen Habitus, z.B. beim bekannten „Spanischen Moos" *(Tillandsia usneoides)*, einer hängenden Tillandsie, die an Bartflechten *(Usnea!)* erinnert (Abb. 2), oder *Ayensua uiapanensis*, die Schopfbäumchen bildet. Einzige Nutzpflanze ist die Ananas. Der Blätterschopf auf einer Ananasfrucht vermittelt einen guten Eindruck über die Hauptwuchsform der Bromelien.

Eine Besonderheit aller Bromeliaceae sind die Saugschuppen (Abb. 3). Es sind meist schildförmige Haare, die der Wasser- und Nährstoffaufnahme dienen. Die Unterfamilie der Tillandsioideae (s.u.) hat sehr regelmäßige Schuppen, die sich in ihrem konstanten Aufbau von denen anderer Unterfamilien unterscheiden.

Es gibt bei den Bromelien eine große Bandbreite von einerseits epiphytischen (d.h. auf anderen Pflanzen aufsitzenden, aber nicht schmarotzenden), bis andererseits normal terrestrischen (auf dem Erdboden wachsenden). Die Wurzeln von epiphytischen Arten fehlen teilweise völlig oder stellen nur noch Haftorgane dar. (Diese Gruppe wird auch als „extrem epiphytisch" bezeichnet.) Sie nehmen Wasser und Nährsalze nur über die Saugschuppen auf, die die Wurzeln ersetzen. Aus diesem Grund sehen diese Arten mehr grau als grün aus. Sie werden immer öfter auch in Lebensmittelläden angeboten, sind aber in der trockenen Zimmerluft unserer Räume meist zum Tode verurteilt. Die vielen terrestrisch wachsenden Arten bilden dagegen normale Wurzeln aus und benötigen eigentlich keine Saugschuppen. Trotzdem besitzen sie immer einige. Eine Zwischenform von epiphytischen zu terrestrischen Arten bilden Trichterbromelien, die ein gut entwickeltes Wurzelwerk besitzen, aber in ihren Rosetten Wasser sammeln und dies über die Saugschuppen aufnehmen. Auf Ananasblättern z.B. lassen sich die Schuppen mit einer Lupe gut erkennen.

Unterschiede der drei Unterfamilien

Die etwa 2500 Arten umfassende Familie wird in drei Unterfamilien gegliedert (SMITH et al. 1974-1979, RAUH 1990). Tab. 1 gibt eine kurze Übersicht.

Die Grenzen zwischen den Unterfamilien werden eigentlich nur an den Früchten und Samen deutlich: Bei den Tillandsioideen sind die Samen mit einer fallschirmartigen Haarkrone versehen, bei den Pitcairnioideen sind die Samen wie kleine Spänchen und geflügelt (erinnern an Birkensamen), bei den Bromelioideen entwickeln sich Beeren, und die Samen haben weder Fallschirme noch Flügel. Die anderen Unterscheidungsmerkmale, wie Blattrand bedornt oder nicht, Fruchtknoten ober- oder unterständig, usw. sind nicht bei allen Vertretern der Unterfamilien durchgängig anzutreffen und können daher nur bedingt für die Grenzziehung um die Unterfamilie verwendet werden.

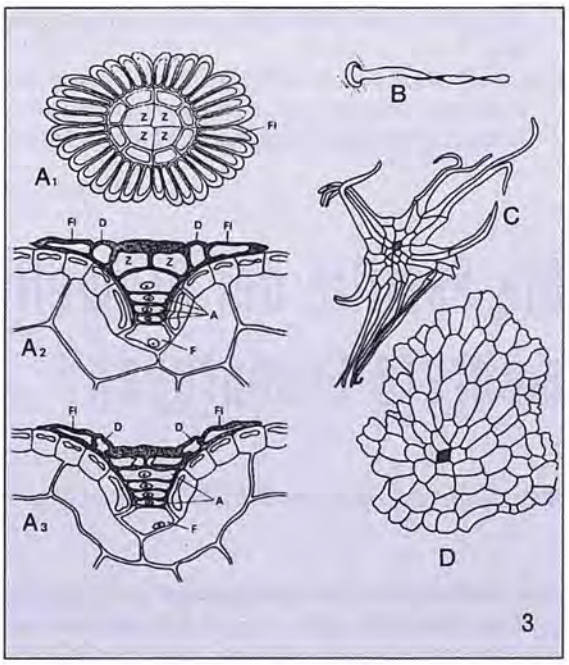


Abb. 3: Saugschuppen verschiedener Bromeliaceae: **A** Vriesea *spec., typischer Tillandsioideen-Typ* **B** Navia splendens, *irregulärer Typ* **C** Fosterella penduliflora, *unregelmäßiger Typ* **D** Hechtia tillandsioides, *regelmäßiger Typ* **A1** *Schuppe in Aufsicht* **A2** *Längsschnitt durch eine Schuppe in nassem Zustand* **A3** *in trockenem Zustand, Z Zentral-, D Deckel-, Fl Flügel-, A Wasseraufnahme-, F Fußzellen. (Schuppen A, C & D nach* RAUH *1990, verändert)*

Eigene Untersuchungen

Im Rahmen eines kurzen Praktikums war Gelegenheit, eine Arbeit über Bromelien bei Dr. G. Zizka am Frankfurter Palmengarten durchführen zu können. (Vielen Dank auch an meine Kommilitoninnen Sylvia Beutel und Petra Schnitzer.) Wir versuchten einerseits herauszufinden, ob man die Gattungen anhand anatomischer Merkmale unterscheiden, andererseits ob man einen anatomischen Unterschied zwischen den Unterfamilien feststellen kann.

Es wurde aus allen im Palmengarten zur Verfügung stehenden Gattungen je ein Vertreter zur Untersuchung ausgewählt und folgende Dauerpräparate von Frischmaterial hergestellt: Querschnitte vom Blatt; Saugschuppen; oberflächenparallele Schnitte und Lackabdrücke der Oberfläche. Die Auswertung erfolgte durch eine Zeichnung des mikroskopischen Präparats und der Schuppen. Die Größenverhältnisse und andere Kriterien wurden erfaßt.

> Die Unterschiede zwischen den Unterfamilien lassen sich sehr schwer in Worte fassen.

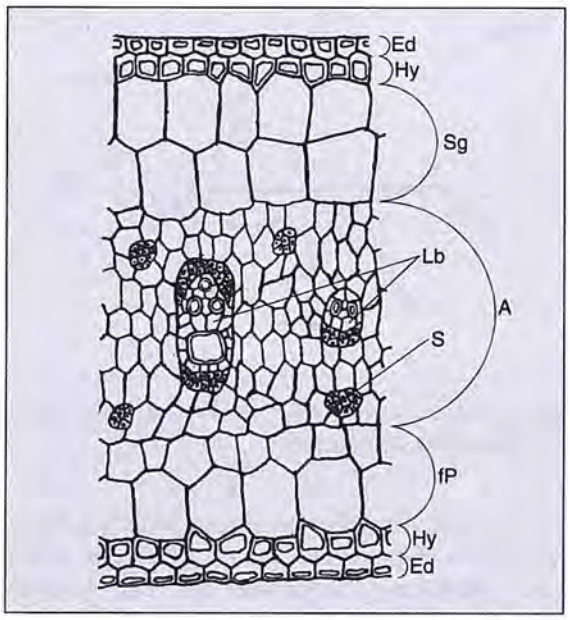


Abb. 4: Schematischer Blattquerschnitt, A Assimilationsgewebe: Gewebe, in dem die Photosynthese stattfindet; Ed Epidermis: einschichtiges Abschlußgewebe; fP farbloses Parenchym: ähnlich dem Speichergewebe, meist nicht so mächtig; Hy Hypodermis; hier: die direkt unter der Epidermis liegenden Zellschichten, die in irgendeiner Form verdickte Zellwände besitzen; Lb Leitbündel mit Sklerenchymscheide; S Sklerenchymfaserstränge: Stränge mit Zellen, die sehr verdickte Zellwände besitzen; Sg Speichergewebe: sukkulente Zellen mit dünnen Zellwänden.

	Tillandsioideae	Bromelioideae	Pitcairnioideae
Blätter	ganzrandig	meist bedornt	ganzrandig oder bedornt, zuweilen heterophyll (d.h. zwei verschiedene Blattformen)
Blüten	mm bis wenige cm	mm bis cm	ein bis mehrere cm
Fruchtknoten	oberständig	meist unterständig	ober- oder halboberständig
Frucht u. Samen	Kapselfrüchte, Samen mit fallschirmartiger Haarkrone	Beerenfrüchte, Samen ohne Flügel oder Haarkrone	Kapselfrüchte, Samen geflügelt oder geschwänzt
Wuchsort	viele Epiphyten, wenige terrestrisch	Epiphyten oder Bodenpflanzen	meist terrestrisch

Tab. 1: Anatomische Unterschiede innerhalb der Bromeliaceae

	Tillandsioideae	Bromelioideae	Pitcairnioideae
Schuppen	sehr regelmäßig und typisch (Abb. 3A)	Schuppen regelmäßig (Abb. 3D)	Schuppen regelmäßig oder unregelmäßig bis irregulär (Abb. 3B-D)
Epidermis	kaum verdickte Zellwände; untere Epidermis fast immer glatt	"doppelt", d.h. Epidermiszellen selbst klein und unscheinbar, dafür die nach innen(!) liegende Zellwand verdickt; untere Epidermis manchmal gewellt	Epidermis unten oft gewellt
Hypodermis	wenig verdickte Zellwände	nach außen liegende Zellwände verdickt, einschichtig	mehrere Zellagen, Zellwände allseits verdickt
Leitbündel	mit kaum sichtbaren Sklerenchym	mit Sklerenchymkappen	mit dicken Sklerenchymscheiden
Sklerenchym	keine Sklerenchymstränge im Blatt (Ausnahme: *Guzmania*)	manchmal weitere Sklerenchymstränge im Blatt	keine weiteren Sklerenchymstränge im Blatt
Parenchym	meist vorhanden	nur wenig bis nicht vorhanden	vorhanden oder nicht vorhanden, teilweise viel
Andere	Gewebe verlaufen ineinander und bilden unregelmäßige, zerteilte Bänder	klare Trennung zwischen Geweben	klare Trennung zwischen Geweben

Tab. 2: Die wichtigsten Merkmale der Unterfamilien der Bromeliaceae. (Nach Rauh 1990, verändert)

Als Ergebnis läßt sich folgendes festhalten: Es lassen sich einige Gattungen anhand anatomischer Merkmale des Blattes sicher erkennen, aber auch hier sind insgesamt keine klaren Grenzen ersichtlich, auch nicht auf dem Niveau der Unterfamilien. Nach dem Bearbeiten des Materials bekamen wir zwar einen Blick dafür, welche Pflanze zu welcher Unterfamilie gehören könnte, aber die Unterschiede lassen sich sehr schwer in Worte fassen. Tab. 2 gibt eine Zusammenfassung dessen, was sich an anatomischen Merkmalsunterschieden ergab. (Abb. 4 zeigt einen schematischen Blattquerschnitt, wobei nicht alle Strukturen bei allen Pflanzen vorkommen.)

Insgesamt läßt sich festhalten, daß sich alle Merkmale, seien sie morphologischer, anatomischer oder ökologischer Art, z.T. stark überschneiden. Nur die Beschaffenheit von Frucht und Samen eignet sich als ein gutes Unterscheidungskriterium (Rauh 1990).

Das Grundtypen-Konzept und seine Anwendung auf die Bromeliaceae

Letztlich sind alle systematischen Einteilungen, auch des gesamten Pflanzenreiches, auf subjektiven Merkmalen aufgebaut. Welches morphologische Merkmal wird wie gewertet? Wann ist etwas so verschieden (bzw. ähnlich), daß es in eine andere (bzw. dieselbe) Kategorie eingeordnet wird? Bis heute ist unklar, wie man Arten, und in weiterer Konsequenz die höheren taxonomischen Einheiten, definieren soll. Ein sicheres Kriterium für die Zugehörigkeit zweier Formen zu einer systematischen Einheit könnte die Kreuzbarkeit sein. Dieses Kriterium erscheint wichtig, weil maternales und paternales Erbgut sehr ähnlich sein müssen, wenn eine Kreuzung stattfinden soll. Es wird von SCHERER (1993) im Grundtypenkonzept aufgegriffen: „Zwei Arten gehören zu einem Grundtyp, wenn sie miteinander kreuzbar sind oder über eine dritte Art kreuzungsmäßig miteinander verbunden sind." Bisher sind erst einige wenige Grundtypen untersucht worden. Es zeigt sich aber, daß meist eine der niedrigeren systematischen Einheiten (Familie, Unterfamilie, Gattung) mit dem Grundtyp übereinstimmt.

Da die Bromeliaceae so einheitlich sind, war meine ursprüngliche Idee, ob sie nicht der taxonomischen Kategorie eines Grundtyps entsprechen könnten. Zur Abgrenzung des Grundtyps sind Berichte über Kreuzungen sehr hilfreich. Die amerikanische Bromeliengesellschaft erfaßt und registriert alle bekanntgewordenen Kreuzungen. BEADLE (1991) hat in einer Liste alle sicher erfolgten Kreuzungen zusammengestellt. (Hier finden sich auch alle weiteren Literaturangaben zu Kreuzungen.) Die Liste wurde durch BASKERVILLE (1994) bis zum Juni 1994 fortgeführt. Nach Sichtung der Literatur über Kreuzungen könnte es sich bei den Bromelien um drei Grundtypen auf dem Niveau der Unterfamilien handeln: Tillandsioideae, Bromelioideae und Pitcairnioideae, denn zwischen ihnen sind keine Kreuzungen bekanntgeworden (RAUH pers. Mitteilung), innerhalb der Unterfamilien jedoch relativ viele (Abb. 5-7). Entweder hat noch niemand Kreuzungen zwischen Unterfamilien probiert, oder aber es sind tatsächlich keine gelungen. Leider sind von weniger als 50% aller Gattungen überhaupt gattungsübergreifende Hybriden bekannt. Kreuzungen innerhalb einer Gattung sind kein Problem; unter Züchtern ist bekannt, daß Gattungskreuzungen leicht möglich sind.

Primäres Ziel für die Zukunft ist es herauszufinden, ob alle Gattungen einer Unterfamilie miteinander

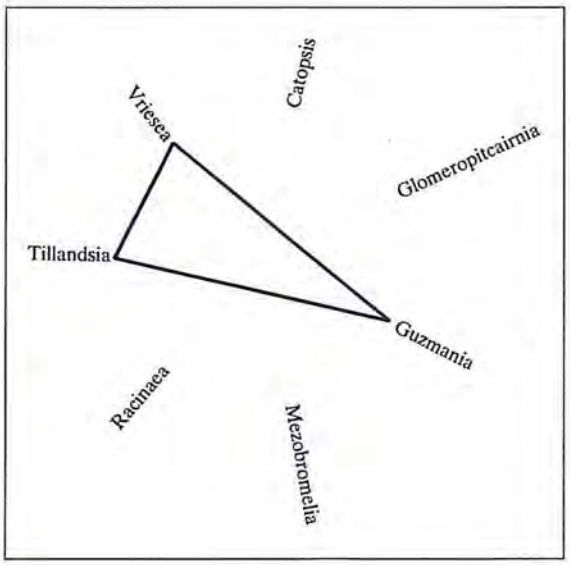


Abb. 5: Kreuzungspolygon für die Tillandsioideen. (Nach BASKERVILLE 1994, BEADLE 1991, EHLERS 1994)

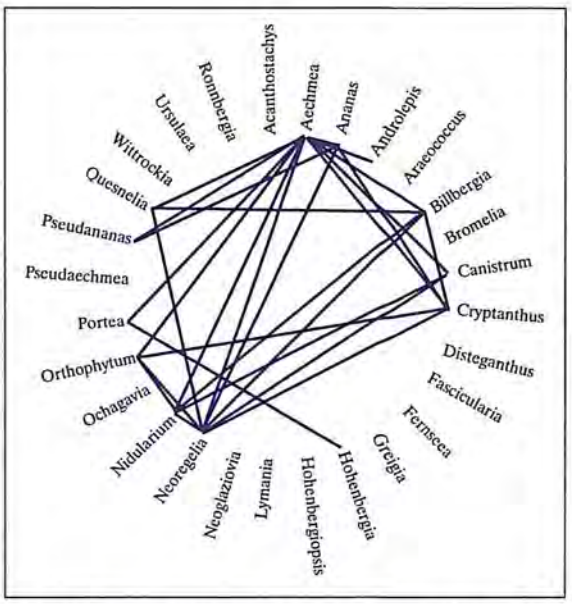


Abb. 6: Kreuzungspolygon für die Bromelioideen. (Nach BASKERVILLE 1994, BAENSCH & BAENSCH 1994, BEADLE 1991)

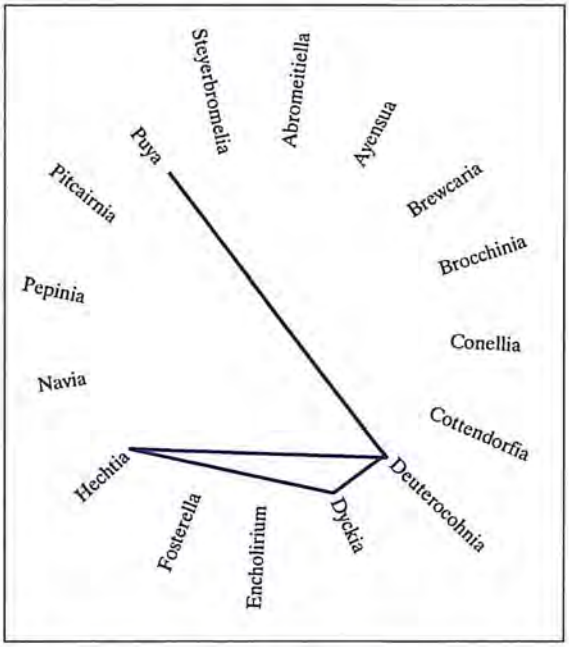


Abb. 7: Kreuzungspolygon für die Pitcairnioideen. (Nach BASKERVILLE 1994, BEADLE 1991).

gekreuzt werden können. Möglicherweise verbergen sich in der heterogenen Gruppe der Pitcairnioideae weitere Grundtypen. Schließlich müssen Kreuzungen zwischen den Unterfamilien untersucht werden. Selbst ein Fehlschlagen aller Kreuzungsbemühungen wäre allerdings noch kein Beweis für tatsächliche Existenz von verschiedenen Grundtypen. Ergänzende Untersuchungen müßten hinzukommen.

Literatur

BASKERVILLE E (1994) Cultivar / Grex Registrations for 1991 – June 1994. J. Bromeliad Soc. *5 (44)*, 214-219.

BAENSCH U & BAENSCH U (1994) Blühende Bromelien. Tropic Beauty Publishers, Nassau / Bahamas.

BEADLE DA (1991) A preliminary listing of all known cultivar and grex names for the Bromeliaceae. Bromeliad Society Inc., Los Angeles.

DAHLGREN RMT, CLIFFORD HT & YEO PF (1985) The families of the Monocotyledons. Structure, Evolution and Taxonomy. Berlin, Heidelberg, New York.

EHLERS R (1994) Änderung in der Nomenklatur: Es gibt eine neue Gattung *Racinaea*. Bromelie *1*, 14-16.

LEHMANN H (1986) Bestimmungsschlüssel für die Gattung Tillandsia. Deutsche Bromelien Gesellschaft, Frankfurt a. M.

RAUH W (1990) Bromelien. Tillandsien und andere kulturwürdige Bromelien. Stuttgart.

SCHERER S (Hg, 1993) Typen des Lebens. Berlin.

SMITH LB & DOWNS RJ (1974-79) Flora Neotropica Monograph. No 13-14, 1-3: Bromeliaceae. (Bd. Tillandsioideae 1977, Pitcairnoideae 1974, Bromelioideae 1979) New York.

Der Ähnlichkeitsbeweis der Evolution – ein Zirkelschluß?

Reinhard Junker, Sommerhalde 10, D-72270 Baiersbronn

Zusammenfassung: **Die Organismen weisen ein hierarchisch abgestuftes Ähnlichkeitsmuster auf. Diese Ähnlichkeitshierarchie wird gewöhnlich nicht allein durch funktionelle Erfordernisse erklärt, sondern darauf zurückgeführt, daß es evolutionäre Kanalisierungen beim Organismenwandel gab. Sie sollen zu homologen Strukturen geführt haben. Seit DARWIN werden Homologien durch gemeinsame Abstammung gedeutet. Die Interpretation von homologen Ähnlichkeiten als Indizien evolutionärer Kanalisierung ist jedoch nur theoriegeleitet, also nur unter der Vorgabe der Evolutionstheorie, möglich. Daraus folgt, daß es den „Homologiebeweis" der Evolution nicht gibt.**

Ähnlichkeit ist ein grundlegendes Phänomen im Bereich des Lebendigen und findet sich auf morphologischer, physiologischer, biochemischer, genetischer oder embryologischer Ebene. Der Vergleich der Organismen deckt eine abgestufte Ähnlichkeit auf, die es erlaubt, die Lebewesen in einer hierarchischen Weise taxonomisch zu ordnen. Das ist kein selbstverständlicher Befund, denn es wäre prinzipiell denkbar, daß die Ähnlichkeitsmuster der Organismen ohne Ordnungsmöglichkeiten auftreten und taxonomische Gruppierungen gar nicht durchführbar sind.

Die Tatsache, daß Lebewesen in hierarchischen Systemen taxonomisch geordnet werden können, wird evolutionstheoretisch durch einen allgemeinen Abstammungsprozeß erklärt. Vielfach werden die (homologen) Ähnlichkeiten der Lebewesen sogar als Hauptindiz für die Evolutionstheorie gewertet, insbesondere in Lehr- und Schulbüchern.[1] In diesem Beitrag soll vor diesem Hintergrund der Frage nachgegangen werden, ob das Ähnlichkeitsmuster der Organismen als unabhängiger Beweis für die postulierte Abstammungsverwandtschaft aller Lebewesen gelten kann.

Ursachen für Ähnlichkeit

„Zufall"

Ähnlichkeiten zwischen Lebewesen können verschiedene Ursachen haben (Abb. 1). Es besteht die Möglichkeit, daß Ähnlichkeiten zufällig sind (z. B. spezielle Übereinstimmungen bei sogenannten „Doppelgängern"). Die Deutung durch „Zufall" erklärt jedoch nichts, denn sie besagt, daß eine konkrete Ursache nicht gefunden wurde. Die außerordentlich weit verbreitete Existenz von Ordnungsmustern bei Lebewesen läßt jedoch systematische Ursachen dafür sehr plausibel erscheinen. Mit „Zufall" zu „erklären" würde bedeuten, daß diese Ursachen unbekannt sind oder gar nicht existieren sollen.

Analogien

Als zweite Ursache für Ähnlichkeiten kommen funktionelle Erfordernisse in Frage. Beispielsweise

erfordert das Bildsehen eine Grundausstattung eines optischen Apparates, woraus funktionell bedingte Ähnlichkeiten resultieren. Ein anderes Beispiel wäre die Ausbildung einer Torpedoform bei schwimmenden Organismen bei unterschiedlichen Grundbauplänen (Abb. 2). Ein großer Teil der Ähnlichkeiten kann durch die zu erfüllende Funktion verstanden werden. Die allein funktionell verstehbaren Ähnlichkeiten geben keine Hinweise auf den Weg ihrer Entstehungsweise, wie im folgenden noch deutlich werden wird. In der Biologie wurde für (scheinbar) nur (oder hauptsächlich) funktionell bedingte (nicht primär abstammungsbedingte, s. u.) Ähnlichkeiten der Begriff der Analogie eingeführt.

Homologien

Beim Studium der Organismen drängt sich jedoch der Eindruck auf, daß viele Ähnlichkeiten nicht oder nicht allein durch die Funktion der betreffenden Strukturen erklärbar sind. Paradebeispiel ist das Knochengerüst der Extremitäten der Landwirbeltiere (Abb. 3), das scheinbar unabhängig von der Funktionsweise der Extremität einen einheitlichen Bauplan erkennen läßt. Hier könnte man argumentieren, daß ein Flügel oder ein Grabbein aufgrund unterschiedlichster Funktionen dieser Strukturen ebenso unterschiedliche Knochengerüste aufweisen sollten. Das ist aber bekanntlich nicht der Fall. Die Übereinstimmung im Bauplan und in den Lagebeziehungen im Gesamtorganismus erscheint in diesem Fall funktionell nicht erforderlich.

Evolutionstheoretisch werden funktionell nicht erklärte Ähnlichkeiten dieser Art durch das Beibehalten evolutiv erworbener Strukturen erklärt. „Homology . . . has to do with what is conserved in evolution" (Roth 1991). Die durch Evolution erworbene Komplexität angelegter embryologischer Grundmuster verhindert eine beliebige Wandelbarkeit der Organismen: weitere Evolutionswege werden dadurch kanalisiert. Als Folge davon treten homologe Ähnlichkeiten auf, die von den analogen, bloß funktionsbedingten und durch die Wirkung von Umwelteinflüssen kanalisierten Ähnlichkeiten unterschieden werden. Homologien werden also – wenn überhaupt – nicht primär aufgrund ihrer Funktionen als solche erkannt (und phylogenetisch ausgewertet), sondern aufgrund der Lage im Organgefüge und aufgrund des morphologisch-anatomischen oder embryologischen Vergleichs (vgl. Abb. 3 und 4, Infokasten; zur Definition und Erkennung von Homologien s. u.). Allerdings wird diese Priorität doch wieder dadurch in Frage gestellt, daß man sich auf embryologisch fixierte Entwicklungsfunktionen beruft, die aufgrund von Selektionswirkungen nur durch einen bestimmten Bauplan erfüllt werden können. Auf diese Weise sollen Bauplanhomologien doch wieder funktionell verständlich werden (Alberch 1982).

Theorieabhängigkeit der Deutung von Homologien

Kann man die Behauptung, manche Ähnlichkeiten seien nicht funktionell bedingt, durch objektive Daten belegen? Wie kann man (teilweise) nichtfunktionell (das heißt evolutionstheoretisch: nichtumweltadaptiv) bedingte Ähnlichkeiten erkennen, wie man sie z. B. bei den Tetrapodenextremitäten (Abb. 3) annimmt? Tatsächlich könnten die Knochengerüste des Grabbeins des Maulwurfs oder des Vogelflügels doch die jeweils optimalen Lösungen der betreffenden Konstruktionserfordernisse sein. Diese Möglichkeit kann kaum ausgeschlossen werden. Dazu müßte man nämlich zeigen, daß ein anders gebautes Knochengerüst die erforderlichen Funktionen besser erfüllt als die verwirklichte Form. Trotzdem geht man stillschweigend davon aus, daß es bessere Lösungen geben könnte. Dieses Stillschweigen erklärt sich aus der Voraussetzung der Evolutionstheorie, nach der suboptimale Lösungen von Konstruktionserfordernissen wegen des erwähnten Kanalisierungseffekts zu erwarten

Glossar

Analogie: Bezeichnung für Strukturen und Organe, die trotz ähnlicher Funktion so verschieden gebaut sind, daß eine gemeinsame Abstammung ausgeschlossen wird, z.B. Vogel- und Insektenflügel.

Evolutionäre Kanalisierung: Organismen können nicht „wegen Umbau schließen" (G. Osche). Das bedeutet, daß der postulierte evolutionäre Wandel immer an bereits vorliegenden Konstruktionen der Lebewesen aufbauen muß. Der jeweils erreichte strukturelle Aufbau der Organismen erlaubt weitere Änderungen nur in bestimmten Richtungen: Kanalisierung.

Homologie: Gleichwertigkeit von Strukturen oder Organen im Bau und in der Lage im Gesamtorganismus, unabhängig von deren Funktion. Auch Verhaltensweisen oder ontogentische Abläufe können homologisiert werden (vgl. Abb. 3 und 4).

Morphologie: Lehre vom Bau und der Gestalt der Organismen und ihrer Organe

Phylogenese: Stammesgeschichte der Organismen

Taxonomie: Wissenschaft, die sich (unabhängig von eventuell zugrundeliegenden Ursprungskonzepten) mit der Ordnung und Einteilung der Lebewesen befaßt.

Typologie: Auf G. Cuvier (1760-1836) und J. W. Goethe (1749-1832) gegründete Lehre, welche die Vielfalt der morphologischen und funktionellen Eigenschaften der Tierwelt auf wenige abstrakte Typen (Baupläne) zurückzuführen versuchte.

sind. Denn im Rahmen einer evolutionären Bildung von Strukturen sind Kompromisse erforderlich. Neue Strukturen und Baupläne können evolutiv nur durch Umbau entstehen. Die jeweils bereits vorhandene Komplexität angepaßter Strukturen verhindert eine beliebige Wandelbarkeit der Organismen.

Nicht-Funktionalität von Ähnlichkeiten ist kein empirischer Befund.

Die nicht-funktionelle Deutung von Ähnlichkeiten ist folglich nur bei Vorgabe der Evolutionstheorie und darüber hinaus nur in Verbindung mit einem konkreten vorausgesetzten Evolutionsverlauf möglich. Nicht-Funktionalität von Ähnlichkeiten ist also kein empirischer Befund. Daraus folgt: Die Feststellung einer nicht-umweltadaptiven Ähnlichkeit ist nur theoriegeleitet möglich und folglich kein unabhängiger Beleg für gemeinsame Abstammung.

Abb. 1: Ursachen für Ähnlichkeiten (Erläuterungen im Text)

Dies ist an sich keine überraschende Erkenntnis, denn es gehört heute fast schon zur wissenschaftstheoretischen Allgemeinbildung, daß es keine aussagekräftigen Fakten ohne Theorien gibt. Da in Schul- und Lehrbüchern die Existenz von (homologen) Ähnlichkeiten jedoch gewöhnlich als „Beweis" für Evolution gewertet wird (vgl. Anm. 1), muß dieser Tatbestand dennoch besonders hervorgehoben werden. Es besteht grundsätzlich ein Spielraum für andere Deutungen. So spielte auch in der vorphylogenetischen idealistischen Morphologie die nicht-funktionelle Deutung von Homologien zur Typusabgrenzung eine dominierende Rolle. Den „Homologiebeweis" für Evolution gibt es also nicht.

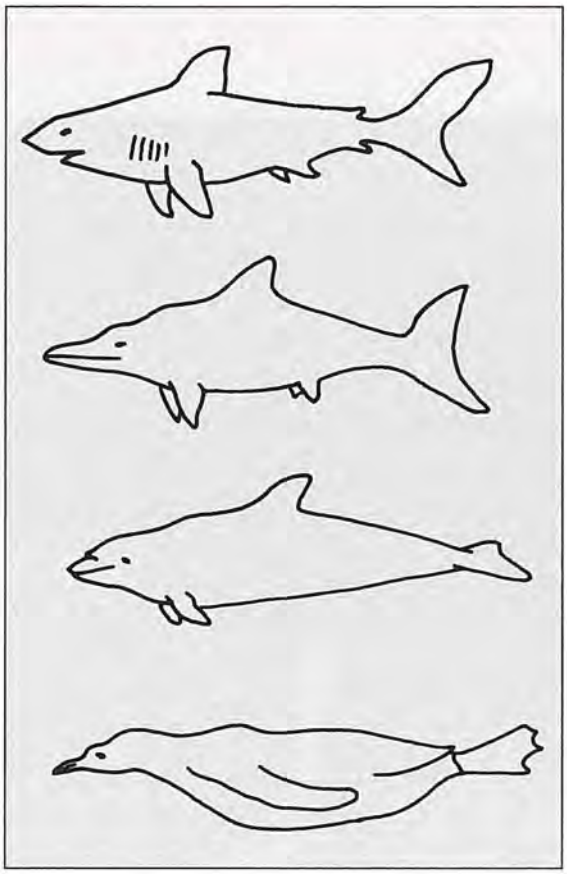


Abb. 2: Analogie als Übereinstimmung der Körperform am Beispiel der Torpedoform von Haifisch, Ichthyosaurier, Delphin und Pinguin (von oben; nach Wuketits 1982).

Rekonstruktion des stammesgeschichtlichen Verlaufs

Für die Rekonstruktion der postulierten Stammesgeschichte kommen nur homologe Ähnlichkeiten in Betracht, denn nur diese scheinen nicht ausschließlich umweltadaptiv zu sein. Wenn alle Ähnlichkeiten allein auf umweltbedingte Anpassungszwänge zurückzuführen wären, gäbe es unter evolutionstheoretischen Prämissen keine Möglichkeit, zwischen abstammungs- und umweltbedingten Ähnlichkeiten zu unterscheiden. Nach morphologischen oder anderen vergleichend biologischen Kriterien wären zwar Homologien bestimmbar, doch würden sie als solche keine Information über ihren Werdegang geben.

Versuche, den mutmaßlichen stammesgeschichtlichen Ablauf anhand des Ähnlichkeitsmusters der Organismen[2] zu rekonstruieren, basieren auf der Annahme, es gebe zahlreiche nicht ausschließlich funktionell bedingte Ähnlichkeiten, also Homologien im eben charakterisierten Sinne, die auf gemeinsame Abstammung zurückgeführt werden. Die entscheidende Voraussetzung, die eine die Stammesgeschichte widerspiegelnde Systematik ermöglicht, ist also die Auffassung, daß „evolutiver Ballast" mitgeschleppt wird, der nicht funktionell erklärbar sein soll. Diese evolutive Erblast entsteht dadurch, daß eine Evolution neuer Organisationstypen nicht beim Punkt Null beginnen kann, sondern an bereits existierenden Organismen. Wie gezeigt wurde, ist diese Voraussetzung anhand des Ähnlichkeitsmusters der Organismen zwar in sich schlüssig, aber nicht beweisbar.

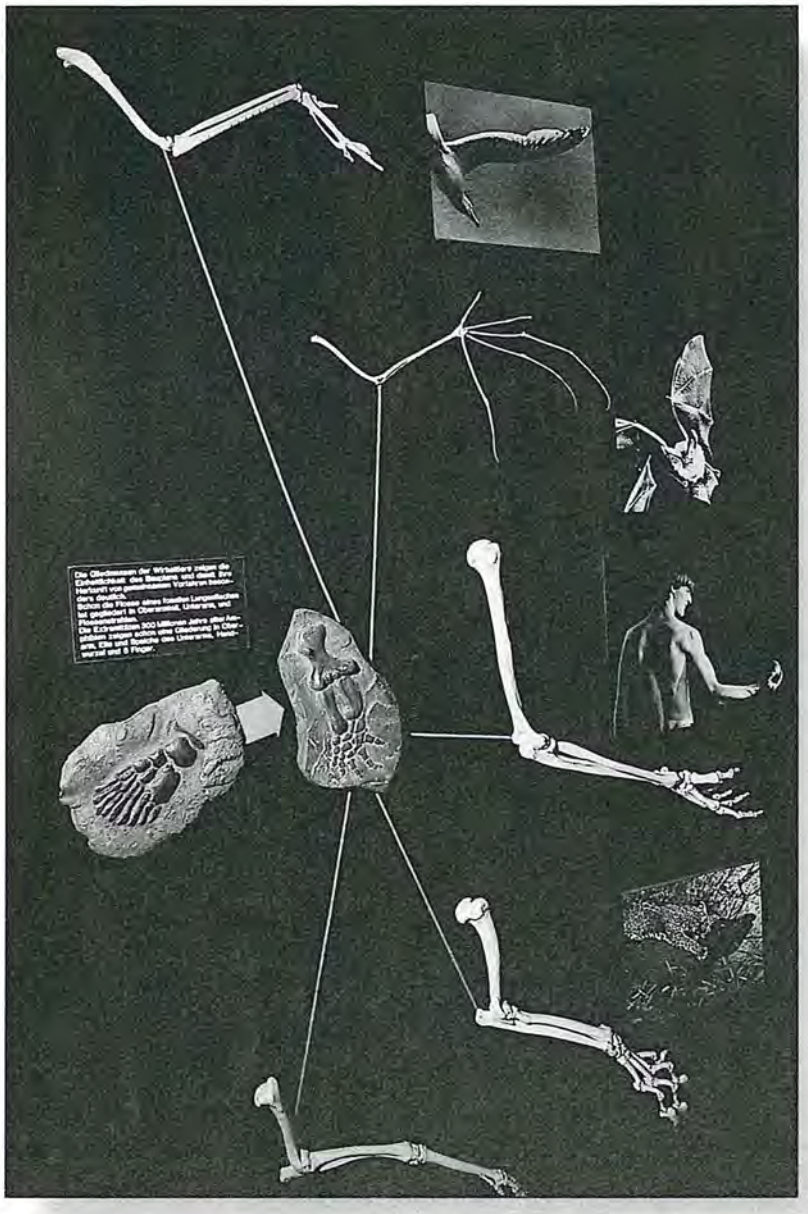


Abb. 3: Das klassische Beispiel für homologe Strukturen nach dem Kriterium der Lage: das Knochengerüst der Vorderextremitäten der Landwirbeltiere. Ausgangspunkt nach evolutionärer Vorstellung ist ein Uramphibium, das das „Strickmuster" des Knochengerüsts erworben hatte. In der weiteren Wirbeltierevolution konnte das Grundmuster trotz unterschiedlichster Funktionen nur noch abgewandelt, aber nicht mehr grundlegend neu „konstruiert" werden. (Westfälisches Museum für Naturkunde, Münster)

Definition und Erkennung von Homologien

Homologien sind also die Basis für eine die Phylogenese rekonstruierende Systematik. Wie werden Homologien definiert und erkannt? Die Antwort auf diese Frage erweist erneut die Theorieabhängigkeit der evolutionären Deutung von Ähnlichkeit.

Definitionen

Im Rahmen der Evolutionslehre kann es nach Auffassung vieler Biologen nur eine Definition von Homologien geben: Danach beruht die Homologie eines Merkmals bei verschiedenen evolutionären Arten oder überindividuellen Naturkörpern (geschlossenen Abstammungsgemeinschaften = monophyletischen Gruppen) auf der Übernahme des Merkmals von einer gemeinsamen Stammart (Ax 1988, 72; Ax spricht ausdrücklich von einer „Definition"). Das zoologische Wörterbuch (Hentschel & Wagner 1986, 319) definiert homologe Organe als „Organe mit gleicher entwicklungsgeschichtlicher Herkunft". Als Beispiel sei auf Abb. 3 und die dortige Bildunterschrift verwiesen. Man kann von einer „phylogenetischen Definition" sprechen; es handelt sich dabei aber bereits um eine Deutung. Einige Biologen wollen in der Definition jedoch eine vorschnelle Festlegung auf den stammesgeschichtlichen Deutungsrahmen ausdrücklich vermeiden. So faßt Osche (1973) Homologien folgendermaßen: „Homolog sind Strukturen, deren nicht-zufällige Übereinstimmung auf gemeinsamer Information beruht." Ähnlich definiert van Valen (1982): „Homology is resemblance caused by a continuity of information" (vgl. Minelli & Peruffo 1991; Roth 1991; Hervorhebungen nicht im Original).

Diese umfassenderen Definitionen haben den Sinn und den Vorteil, daß mit ihnen auch Homonomien (seriale Homologien, z. B. Ähnlichkeiten zwischen den Vorder- und Hinterextremitäten), Symmetrien und sexuelle Homologien (Sexualdimorphismen; Ähnlichkeiten zwischen den Geschlechtern) erfaßt werden können. Sie verzichten im Gegensatz zur phylogenetischen Definition auf die Bestimmung der gemeinsamen Informationsquelle. Sie bieten jedoch kein Werkzeug, mit dem Homologien erkannt werden können. Zu diesem Zweck muß auf morphologische Kriterien zurückgegriffen werden (s. nachfolgenden Abschnitt). Die phylogenetische Definition ist lediglich ein Ausdruck der vorausgesetzten Evolutionstheorie und zum Zwecke des Erkennens von Homologien unbrauchbar. Darauf haben bereits Naef (1931) und Hertwig (1906) hingewiesen. Auch die theoriefreien Versionen von Osche und van Valen bieten keine praktische Handhabe in konkreten Fällen. Daher müssen Erkennungskriterien formuliert werden.

Erkennungskriterien

Das Erkennen von Homologien und die Unterscheidung von für die Phylogenetik unbrauchbaren Konvergenzen ist in der Praxis oft sehr schwierig, wenn nicht unmöglich. Inglis hat diese Schwierigkeit überspitzt auf den Punkt gebracht: „Two structures are homologous when in the opinion of a competent comparative anatomist they are homologous" (zit. in Dohle 1989). Subjektive Wertungen spielen bei der Bestimmung von Homologien eine nicht auszuschaltende Rolle. Umso anerkennenswerter ist das Bemühen, subjektive Elemente zu minimieren. Dies

versuchte A. REMANE (1952) mit den schon klassisch zu nennenden morphologischen Homologiekriterien (Infokasten). Sie gehen bemerkenswerterweise auf einen Antievolutionisten, nämlich Richard OWEN (1843) zurück. Er definierte: „Homologue. The same organ in different animals under every form and function" (zit. nach BOCK 1989; vgl. J. REMANE 1989). Diese Definition wurde verfeinert und auf verschiedene Weise konkretisiert. Bekannt sind die drei Homologiekriterien der Lage, der spezifischen Qualität und der Kontinuität (Abb. 4, Infokasten), neben denen es noch weitere Hilfskriterien gibt.

Die vergleichend-biologischen Kriterien können unabhängig vom zugrundegelegten Ursprungskonzept angewendet werden. Homologien können durch diese Kriterien auch ohne das Wissen bzw. die Annahme von Evolution erkannt werden. Die Erkennungskriterien sind auch im Rahmen einer Schöpfungslehre anwendbar.

RIEPPEL (1988, 49) versucht, die verschiedenen Aspekte der Homologiedefinitionen zu kombinieren: „Homology is an equivalence relation of a set of forms which share a common structural plan and are thus transformable one into the other." „Transformable" kann im phylogenetischen Sinn gedeutet, könnte aber auch im idealistischen Sinn verstanden werden (im Sinne von Variationen von Grundbauplänen).

Der Zusammenhang zwischen phylogenetischer Deutung und vergleichend-biologischen Erkennungskriterien

Der Begriff Homologie stammt – wie bereits erwähnt – aus „vorphylogenetischer" Zeit, und erstaunliche Homologiefeststellungen wurden unabhängig von der Darwinschen Deszendenztheorie getroffen, z. B. die Reichertsche Theorie über die Homologisierung der Gehörknöchelchen der Säugetiere mit Kiefergelenkknochen der Reptilien im Jahre 1837 (vgl. ULLRICH 1994) oder die Homologisierung der Pollensäcke und Samenanlagen der Samenpflanzen mit den Mikro- und Makrosporangien der Farne durch HOFMEISTER im Jahre 1851 (vgl. z. B. EHRENDORFER 1991, 699).

Über phylogenetische Zusammenhänge sagen die nach anatomisch-morphologischen Kriterien erkannten Homologien nichts aus. Sie können – wie die gerade genannten Beispiele zeigen – genausogut im Sinne eines statisch-typologischen Konzepts ausgewertet werden. Phylogenetische Deutung und vergleichend-biologische Erkennungskriterien stehen zunächst also unverbunden nebeneinander. In der Diskussion um die Erkennbarkeit und phylogenetische Verwertbarkeit von Homologien müssen daher zwei Ebenen auseinandergehalten werden: Die empirische (die relativ wenig theoriegebunden ist) und die kausale (theoriegebundene) Beurteilung (Interpretation) und Anwendung von

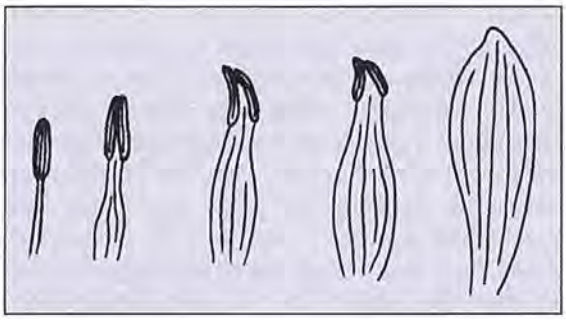


Abb. 4: Das Homologie-Kriterium der Kontinuität am Beispiel des Übergangs von Staubblättern zu Blütenblättern durch Verbreiterung der Filamente bei der Seerose. (Nach OSCHE 1972)

Homologien. Die erste ermöglicht nach klar bestimmbaren Kriterien (vgl. Abb. 3, 4, Infokasten) eine Unterscheidung zwischen Homologie und Nicht-Homologie. Die zweite Ebene beinhaltet eine Deutung über die Ursache der Homologien (gemeinsame Abstammung? Abwandlung eines Bauplans?) und sollte zusammen mit der ersten Kriterien zur Abgrenzung von Homologien und Nicht-Homologien liefern.[3]

> Die gemeinsame Informationsquelle kann die empirisch arbeitende Biologie nicht bestimmen.

Die Informationsquelle für Homologien

Worin besteht die von OSCHE und von VAN VALEN angesprochene gemeinsame Informationsquelle? Wird sie in einem gemeinsamen Vorfahren identifiziert, resultiert daraus die o. g. phylogenetische Definition für Homologie. Wie bereits erläutert wurde, ist diese Feststellung nicht aus dem Ähnlichkeitsbefund ableitbar, sondern muß vorgegeben werden. Die gemeinsame Informationsquelle kann die empirisch arbeitende Biologie nicht bestimmen. Homologie ist ein deduktives Konzept (RIEPPEL 1980). D. h.: Nicht das Zustandekommen von Homologien wird erforscht, sondern der vorliegende Tatbestand der Existenz homologer Strukturen im

Infokasten: Homologiekriterien
(nach A. Remane)

Kriterium der Lage: Organe oder Strukturen sind homolog, wenn sie die gleiche Lage in einem vergleichbaren Gefügesystem einnehmen (vgl. Abb. 3).

Kriterium der Kontinuität: Organe sind homolog, wenn sie sich durch eine Reihe von Zwischenformen miteinander verbinden lassen (vgl. Abb. 4).

Kriterium der spezifischen Qualität: Komplexe Organe sind (unabhängig von ihrer Lage) homolog, wenn sie in zahlreichen Charakteren übereinstimmen, also etwa gleich gebaut sind.

Rahmen theoretischer Vorgaben interpretiert. OSCHE (1973) meint dazu, in der Phylogenetik werde nur Vererbung als einzige Form der Informationsübertragung zugelassen; als Informationsspeicher könne jedoch auch „ein 'Schöpfer' angenommen werden, nach dessen 'Plan' die verglichenen Strukturen erstellt worden sind". Es könnten auch Systeme homologisiert werden, die im biologischen Sinn keineswegs durch Phylogenese entstanden sind. Ähnlich hat sich auch PETERS (1984, 202) geäußert: Das Phänomen der hierarchisch geordneten Ähnlichkeit der Lebewesen vertrage sich ganz außerordentlich gut mit der Vorstellung einer Evolution. „Es verträgt sich aber mindestens ebensogut mit der Vorstellung einer *scala rerum* oder einer statisch typologisch geordneten Welt. Ohne Zusatzannahmen zwingt die Ähnlichkeit der Organismen für sich allein also keineswegs zu einem Glauben an Evolution." Die mit morphologischen Kriterien ermittelten Homologien lassen sich zwar phylogenetisch deuten, doch stehen sie auch anderen Deutungsweisen offen.

„Ohne Zusatzannahmen zwingt die Ähnlichkeit der Organismen für sich allein also keineswegs zu einem Glauben an Evolution."

Ein Zitat von LUBOSCH (1931, 39) zur Geschichte der Homologiedeutung vor und nach DARWIN verdeutlicht diese Situation: „Trotz dieser Umdeutung der Begriffe und trotz dem dadurch hervorgerufenen Anschein einer völlig neuen Richtung in der Morphologie ist nun aber von irgend einer Lücke im Gange der Forschung selbst nirgends etwas zu finden. Der Fortschritt der morphologischen Einzelerkenntnisse geht fugenlos über das Jahr 1859 hinweg. Die bisherigen Forschungen werden einfach fortgesetzt, ja die Ergebnisse, die wir vielleicht als die wichtigsten unserer Periode ansehen können,... hätten nicht nur ohne den Darwinismus entstehen können, sondern wären tatsächlich in der Sprache der Typus- und Urformlehre einwandfreier auszudrücken gewesen." Zu einem ähnlichen Urteil gelangt GUTMANN (1989, 29): „Es wurden mit dem Aufkommen der Evolutionstheorie nur die Ordnungsschemata der Lebewesen, die Systematik und Formenbeschreibung umgedeutet"; die darwinistische Evolutionstheorie sei so gesehen gar kein wirklicher Einschnitt gewesen.

In diesem Zusammenhang ist auch interessant, daß die vorphylogenetischen Systeme den modernen weitgehend glichen; Abweichungen können mindestens teilweise durch den Datenzuwachs erklärt werden (die Gräsertaxonomie ist ein Beispiel dafür; vgl. dazu beispielhaft JUNKER 1993) und sind dann nicht auf das Umschwenken zur Evolutionslehre zurückzuführen.

Homologie-Festellung und phylogenetische Deutung: ein Zirkelschluß?

Aufgrund dieses Sachverhalts wird immer wieder auf die Zirkularität der Homologie-Interpretation hingewiesen (vgl. BOCK 1969; MAYR 1984, 176). Danach werden Homologien einerseits verwendet, um die Phylogenese zu begründen, andererseits werden unter der Vorgabe eines hypothetischen Abstammungsverlaufs Homologien festgestellt. Der Zirkel läßt sich dadurch nicht umgehen, daß man – wie oben durchgeführt – Definition und Erkennungskriterien trennt (phylogenetische Definition; vergleichend-biologische Kriterien). Denn die Ergebnisse des Vergleichs von Organismen bzw. Strukturen lassen sich nicht ohne theoretische Vorgaben in einen Stammbaum übersetzen. D. h.: Die Feststellung von Homologien nach wohldefinierten Kriterien (vgl. Infokasten) führt nicht „automatisch" zur Bestimmung eines Abstammungsverlaufs. Es ist nur ein hypothetisch-deduktives Verfahren dergestalt möglich, daß in einem ersten Schritt ein Evolutionsverlauf postuliert wird und dann eine Prüfung erfolgt, ob der postulierte Verlauf eine widerspruchsfreie Deutung der Befunde ermöglicht. In der Praxis ist das jedoch oft mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden (vgl. z. B. AX 1988; SUDHAUS & REHFELD 1992).[4]

BOCK (1989) stellt fest, daß die Evolutionstheorie die Homologieforschung und ihre Schlußfolgerungen diktiert und nicht umgekehrt. „If any conflict exists between the accepted principles of evolutionary theory and the methods of homology analyses, then the latter are in error and must be reconsidered" (S. 330). Es sei verkehrt zu meinen, Homologieforschung könne unabhängig von anderen biologischen Ideen betrieben werden.

Schlußfolgerungen und Ausblick

Die Diskussion der Definition und Erkennung von homologen Ähnlichkeiten, die als Grundlage für phylogenetische Betrachtungen herangezogen werden, hat die Theorieverflochtenheit des „Homologiebeweises" der Evolution deutlich gemacht. Die (homologe oder analoge) Ähnlichkeit der Organismen an sich gibt über ihre Ursache keine eindeutige und zwingende Auskunft. Daher liefern Ähnlichkeiten keinen Beweis für Evolution. Der Ähnlichkeitsbefund kann zwar im evolutionstheoretischen Kontext interpretiert werden, doch steht er grundsätzlich auch einer Deutung im Rahmen eines typologischen Konzepts im Sinne einer Schöp-

fungslehre offen. Daraus ergibt sich die Aufgabe, Prüfkriterien zu entwickeln, die eine Bewertung der unterschiedlichen Interpretationen von Ähnlichkeit erlauben.

Dank

Den Herren Dr. Martin ADLER, Peter KLÖCKNER, Dr. Herfried KUTZELNIGG, Prof. Dr. Siegfried SCHERER und cand. med. Henrik ULLRICH danke ich für konstruktive Kritik und wertvolle Hinweise.

Anmerkungen

[1] Nach Auffassung von BAYRHUBER & KULL (1989, 442) *„liefert die Erforschung von Homologien in allen Teilgebieten der Biologie die Begründung der Abstammungslehre* und erlaubt die Feststellung der stammesgeschichtlichen Verwandtschaften" (Hervorhebung im Original).
„Die einfachste Erklärung für Homologien .. . ist die Abstammung von gemeinsamen Vorfahren" (BAUER 1981, 332).
„Haben verschiedene Arten gleiche Organe, so vermuten wir übereinstimmende Gene. Eine derartige Übereinstimmung kann *nur* aus der Stammesgeschichte erklärt werden" (MIRAM & SCHARF 1988, 378; Hervorhebung nicht im Original).
OSCHE (1972, 11) nennt die Zeugnisse der Homologienforschung unter der Rubrik „Beweise für die Deszendenztheorie". „Sie liefern den Beweis für die Verwandtschaft aller Lebewesen, d. h. für deren Wurzel in *gemeinsamen Ausgangsformen*" (S. 20, Hervorhebung im Original).
SIEWING (1982, 103) ist der Auffassung, daß die abgestufte Ähnlichkeit der Organismen *„kausal nur* durch die Annahme einer gemeinsamen historischen, also stammesgeschichtlichen Herkunft gegeben werden" könne (Hervorhebung nicht im Original).
[2] Der Fossilbericht spielt für die Ermittlung stammesgeschichtlicher Zusammenhänge – abgesehen von groben Tendenzen – wegen des systematischen Fehlens von Zwischenformen in den meisten Fällen keine wesentliche Rolle. „In weiten Bereichen der Fauna und Flora sind wir mangels fossilisationsfähiger Gewebe gänzlich auf den Zeithorizont der Gegenwart beschränkt... Aber auch bei Einheiten, für welche eine fossile Überlieferung vorliegt, bilden die heute lebenden Arten die Basis der phylogenetischen Verwandtschaftsforschung" (AX 1988, 137f.). Nach SUDHAUS & REHFELD (1992, 202) sind Fossilien „zum Aufstellen von Stammbäumen der *rezenten Organismen* nahezu entbehrlich" (Hervorhebung nicht im Original).
[3] Die Frage, wie gut dies gelingt und welche Schwierigkeiten damit verbunden sind, soll einer gesonderten Untersuchung vorbehalten bleiben.
[4] Darauf wird hier nicht weiter eingegangen; dieser Sachverhalt soll jedoch in einer späteren Arbeit dargestellt und aufgearbeitet werden (vgl. Anm. 3).

Literatur

ALBERCH P (1982) Developmental constraints in evolutionary processes. In: BONNER JT (ed) Evolution and development. Berlin, S. 313-332.
AX P (1988) Systematik in der Biologie. Stuttgart.
BAUER EW (Hg., 1981) CVK Biologiekolleg. Berlin.
BAYRHUBER H & KULL U (Hg., 1989) Linder Biologie. Lehrbuch für die Oberstufe. Stuttgart.
BOCK W (1969) Discussion: the concept of homology. Ann. N. Y. Acad. Sci. *167*, 71-73
BOCK W (1989) The homology concept: its philosophical foundation and practical methodology. Zool. Beitr. *32*, 327-353.
DOHLE W (1989) Zur Frage der Homologie ontogenetischer Muster. Zool. Beitr. *32*, 355-389.
EHRENDORFER F (1991) Dritte Abteilung: Spermatophyta, Samenpflanzen. In: SITTE P, ZIEGLER H, EHRENDORFER F & BRESINSKY A (1991) Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Begr. von E. Strasburger u. a. Stuttgart, Jena, New York, S. 699-828.
GUTMANN WF (1989) Die Evolution hydraulischer Konstruktionen. Frankfurt/M.
HENTSCHEL E & WAGNER G (1986) Zoologisches Wörterbuch. Stuttgart, Jena.
HERTWIG O (1906) Handbuch der vergleichenden experimentellen Entwicklungslehre der Wirbeltiere. Jena.
JUNKER R (1993) Der Grundtyp der Weizenartigen (Poaceae, Tribus Triticeae). In: SCHERER S (Hg) Typen des Lebens. Berlin, S. 95-112.
LUBOSCH W (1931) Geschichte der vergleichenden Anatomie. In: BOLK L (Hg.) Handbuch der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere, Bd. 1. Berlin - Wien.
MAYR E (1984) Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt. Heidelberg.
MINELLI A & PERUFFO B (1991) Developmental pathways, homology and homonomy in metameric animals. J. evol. Biol. *3*, 429-445.
MIRAM W & SCHARF KH (1988) Biologie heute SII. Hannover.
NAEF A (1931) Allgemeine Morphologie (Die Gestalt als Begriff und Idee). In: BOLK L (Hg.) Handbuch der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere. Berlin, Wien.
OSCHE G (1972) Evolution. Grundlagen - Erkenntnisse - Entwicklungen der Abstammungslehre. Freiburg.
OSCHE G (1973) Das Homologisieren als eine grundlegende Methode der Phylogenetik. Aufs. Reden Senckenb. naturf. Ges. *24*, 155-165.
PETERS DS (1984) Evolutionstheorie - Zwangsläufigkeit und Grenzen. In: KAISER P & PETERS DS (Hg.) Evolutionstheorie und Schöpfungsverständnis. Regensburg, S. 193-218.
REMANE A (1952) Die Grundlagen des natürlichen Systems, der vergleichenden Anatomie und der Phylogenetik. Leipzig.
REMANE J (1989) Die Entwicklung des Homologie-Begriffs seit Adolf Remane. Zool. Beitr. *32*, 497-503.
RIEPPEL O (1980) Homology, a deductive concept? Z. zool. Syst. Evolut.-forsch. *18*, 315-319.
RIEPPEL O (1988) Fundamentals of comparative biology. Basel.
ROTH VL (1991) Homologies and hierarchies: problems solved and unresolved. J. evol. Biol. *4*, 167-194.
SIEWING R (1982) Biologische Evolution. Einführung in die Problematik. In: SIEWING R (Hg) Evolution. Stuttgart, S. 95-118.

SUDHAUS W & REHFELD K (1992) Einführung in die Phylogenetik und Systematik. Stuttgart, Jena, New York.
ULLRICH H (1994) Embryologie und Homologie: Die Gaupp-Reichertsche Theorie. Stud. Int. J. *1*, 15-24.
VAN VALEN L (1982) Homology and causes. J. Morphol. *173*, 305-312.
WILLMANN R (1985) Die Art in Raum und Zeit. Berlin und Hamburg.
WUKETITS FM (1982) Grundriß der Evolutionstheorie. Darmstadt.

Adam kam aus...
Neues zur Ausbreitungsgeschichte des Menschen

Sigrid Hartwig-Scherer, Frühlingstr. 67a, D-85354 Freising

Zusammenfassung: **Bezüglich des Ursprungsortes und Ausbreitungszentrums des anatomisch-modernen Menschen wird die Monoregionale Evolutionsvorstellung mit mehrheitlichem Konsens der Multiregionalen Hypothese vorgezogen. Bislang galt Afrika als der Ort des Hauptgeschehens, sowohl was die Evolution des anatomisch-modernen Menschen als auch die des *Homo erectus* betrifft. Verschiedene neuere Erkenntnisse erfordern eine Umorientierung bezüglich dieser Vorstellung. So finden sich vermehrt Hinweise darauf, daß *Homo sapiens*-Formen im Nahen Osten (Israel) ebenso alt gewesen sein können wie in Afrika und daß sie sich von ihrer Morphologie als Ausgangsformen gleichermaßen eignen. Außerdem erfordert die Neudatierung javanischer *Homo erectus*-Fossilien auf 1,6-1,8 Millionen Jahre eine Revision der Vorstellung, daß diese Menschenform in Afrika entstand und erst relativ spät diesen Kontinent verließ. Die neueren Erkenntnisse aus Chronologie, Morphometrie und Molekularbiologie sind möglicherweise auch mit der Vorstellung vereinbar, daß sowohl der moderne Mensch als auch andere Menschenformen im Nahen Osten entstanden sein könnten.**

Widersprüchliche Theorien

Eine zentrale Debatte der Anthropologie der 80er Jahre rankte sich um den Ursprungsort und das Ausbreitungszentrum des anatomisch-modernen Menschen. Zwei grundlegend verschiedene Modelle wurden und werden diskutiert: (a) Multiregionale Evolution (WOLPOFF 1989; WOLPOFF & THORNE 1991; auch Regionale Kontinuität, Kandelabermodell, Noahs Söhne, Neandertalphasenmodell genannt) und (b) das „Single-Origin"-Modell (STRINGER 1991; STRINGER & ANDREWS 1988; auch unter Arche-Noah Modell, Garten-Eden-Modell, „Out of Afrika 2", Mutter-Eva-Hypothese, „Population replacement" bekannt). Ersteres Modell nimmt an, daß der heutige Mensch an verschiedenen Orten gleichzeitig aus lokalen Vertretern des *H. erectus* evolvierte. Das zweite postuliert einen einzigen Entstehungsort, von dem aus sich der anatomisch-moderne Mensch über die Alte Welt ausbreitete und frühere Menschenformen ersetzte. Der klar favorisierte Ursprungsort war bisher Afrika, u. a. von Günter BRÄUER aus Hamburg begründet und vertreten (BRÄUER 1984; 1992). Für dieses Modell sprach unter anderem, daß die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung des heutigen Menschen an einem einzigen Ursprungsort größer erscheint als eine mehr oder weniger gleichzeitige und unabhängige Entstehung an mehreren Orten. Eine kontroverse Gegenüberstellung geben THORNE & WOLPOFF (1992) und WILSON & CANN (1992).

Mehrfacher Ursprung des Menschen?

Die ursprüngliche Interpretation mitochondrialer DNA-Daten (CANN et al. 1987), unter dem Begriff „Mutter-Eva-Hypothese" bekannt geworden, war zunächst eines der stärksten Argumente für die „Out of Africa 2"-Hypothese. Da sich jedoch die vorgeschlagene Version mit Afrikanischen Populationen als Stammbaumwurzel als statistisch nicht signifikant herausgestellt hat (MADDISON 1991; TEMPLETON 1992), ist die „Mutter-Eva"-Hypothese vermehrt in Kritik geraten. Das wurde von verschiedener Seite als Stärkung für die multiregionale Hypothese angesehen. Eine kürzlich in *Nature* erschienene Arbeit chinesischer Forscher wird von deren Autoren als Unterstützung des Multiregionalen Modells gewertet (CHEN et al. 1994): ein in den 80er Jahren gefundener früher archaischer *Homo sapiens* aus Jinniushan (China) wurde kürzlich auf 200.000 Jahre datiert und lebte möglicherweise zeitgleich mit den spätesten *erectus*-Formen aus Zhoukoudian. Die Autoren sehen im neu rekonstruierten Schädel klare Hinweise für eine lokale Kontinuität im *erectus-sapiens* Übergangsfeld und grenzen diesen chinesischen

Übergang gegen die Afro-Europäische Linie ab. Der Fund zweier mittelpleistozäner Schädel (Hubei-Provinz, China), die auf ca. 350.000 Jahre datiert wurden und eine Kombination von *sapiens*- und *erectus*-Merkmalen aufweisen, ist zuvor schon für die multiregionale Deutung herangezogen worden (Li & Etler 1992).

Einmalige Entstehung des Menschen

Zwei weitere Arbeiten richten sich nun explizit gegen das multiregionale Modell: Bowcock et al. (1994) untersuchten eine größere Anzahl hochvariabler Genloci (Genorte) in Mikrosatelliten (kurze Reststücke eines Chromosomenarms). Diese Untersuchungen, die sich im Gegensatz zu anderen genetischen Arbeiten nicht auf ein einziges Locus beschränken, können die geographische Herkunft einzelner Individuen mit ziemlicher Genauigkeit bestimmen. Der Vergleich einzelner Populationen ergab, daß die Diversität in den Mikrosatelliten in Afrika am höchsten ist – im Gegensatz zu manch anderen kernkodierten Markern.

> Vielleicht kann der Nahe Osten auch als Ausbreitungszentrum angesehen werden.

Neue morphologische Untersuchungen, die von Diane Waddle von der State University of New York at Stony Brook an pleistozänen Schädeln durchgeführt wurden, bestätigen erneut die „Single-Origin"-Hypothese (Waddle 1994). Das besondere der Arbeit liegt jedoch nicht in einer weiteren Schwächung des Multiregionalen Modells, sondern in der Verschiebung des Ausbreitungszentrums: der Nahe Osten, auch Levantischer Korridor, sprich Israel, genannt, rückt ins Zentrum des Interesses, auch wenn Waddle dieses Ergebnis noch etwas zurückhaltend formuliert. Mittels Matrix-Korrelationen vergleicht sie die beobachteten morphologischen Distanzen mit solchen, die man jeweils für die verschiedenen Hypothesen erwarten würde. Die Hypothese, die der beobachteten Distanzmatrix am nächsten kommt, „gewinnt". 83 untersuchte Schädel wurden in 3 zeitliche und 4 geographische Einheiten untergliedert (Zeiträume: 600.000-125.000, 125.000-32.000, 32.000-8.000 Jahre; Geographische Regionen: Westeuropa/Osteuropa/Südwestasien/Afrika). Die größte Ähnlichkeit der Matrizen bestätigte das „Single-Origin-Modell" mit Israel als Zentrum: während für Afrika ein Korrelationskoeffizient von 0.407 ermittelt wurde, beträgt er für Israel 0.577.

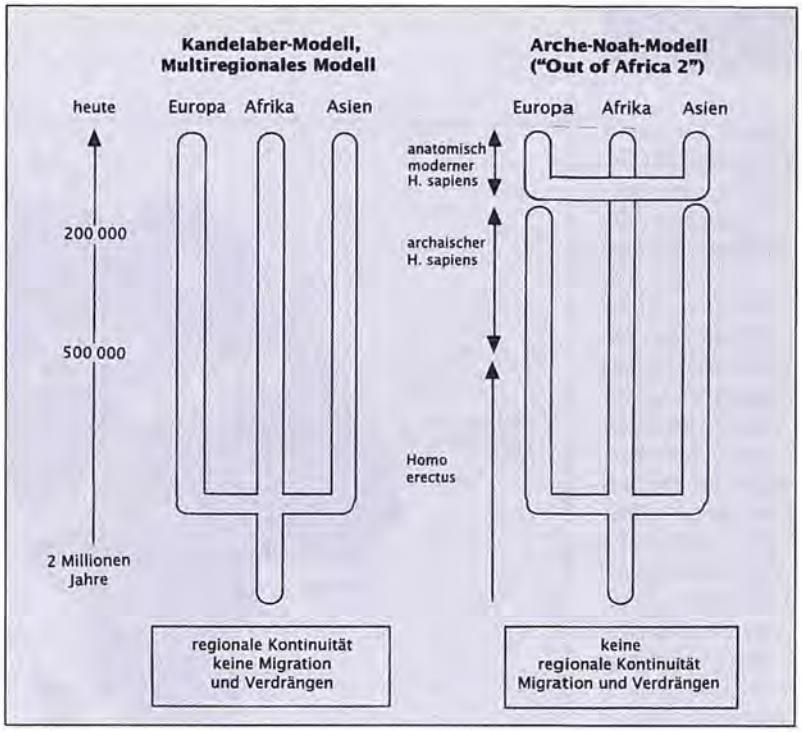


Abb. 1: Zwei kontroverse Vorstellungen zur Entwicklung des anatomisch-modernen Menschen: a) das Multiregionale Modell (Kandelaber-Modell) versteht die heutigen Populationen als direkte Nachfahren von H. erectus, *der vor fast 2 Millionen Jahren Afrika verlassen hat. An verschiedenen Orten haben sich* erectus*-Populationen zu* Homo sapiens *entwickelt (regionale Kontinuität). b) Das Single-Origin-Modell (modifiziert nach Lewin 1992) geht davon aus, daß nur eine Population (bei den meisten Autoren bis jetzt die Afrikanische) überlebte, die die archaische* sapiens*-Form hervorbrachte und im Zuge ihrer Verbreitung über die Alte Welt die anderen Formen verdrängte.*

Schon seit gewisser Zeit diskutiert man Fossilien aus Afrika und Israel im Sinne eines Afro-Levantischen Ursprungs des heutigen Menschen (Foley & Lahr 1992). Genetische Untersuchungen, die Afrika als Zentrum postulieren, können nicht als Evidenz gegen Israel herangezogen werden, solange keine Populationen aus dem Nahen Osten berücksichtigt wurden. Bei oben besprochener Arbeit von Bowcock et al. (1994) wurden zwar drei Populationen von Gebieten südlich der Sahara, zwei von Europa, drei von Ostasien, drei von Ozeanien, und drei von Amerika untersucht, ohne jedoch Populationen vom Nahen Osten oder angrenzenden Gebieten einzubeziehen. Vielleicht kann der Nahe Osten nun nicht nur als biogeographischer Korridor zwischen Afrika und Asien bzw. Europa, sondern auch als Ausbreitungszentrum angesehen werden.

Ursprung von Homo erectus

Nicht nur „Out of Africa 2", das von jeher recht kontrovers diskutiert wurde, ist ins Wanken geraten, sondern auch das Modell „Out of Africa 1", das auch für *H. erectus* Afrika als Ursprungsland und Ausbreitungszentrum annimmt. Bisher ging man davon aus, daß in Afrika die weitaus ältesten *H. erectus*-Funde vorkommen, während alle außerafrikani-

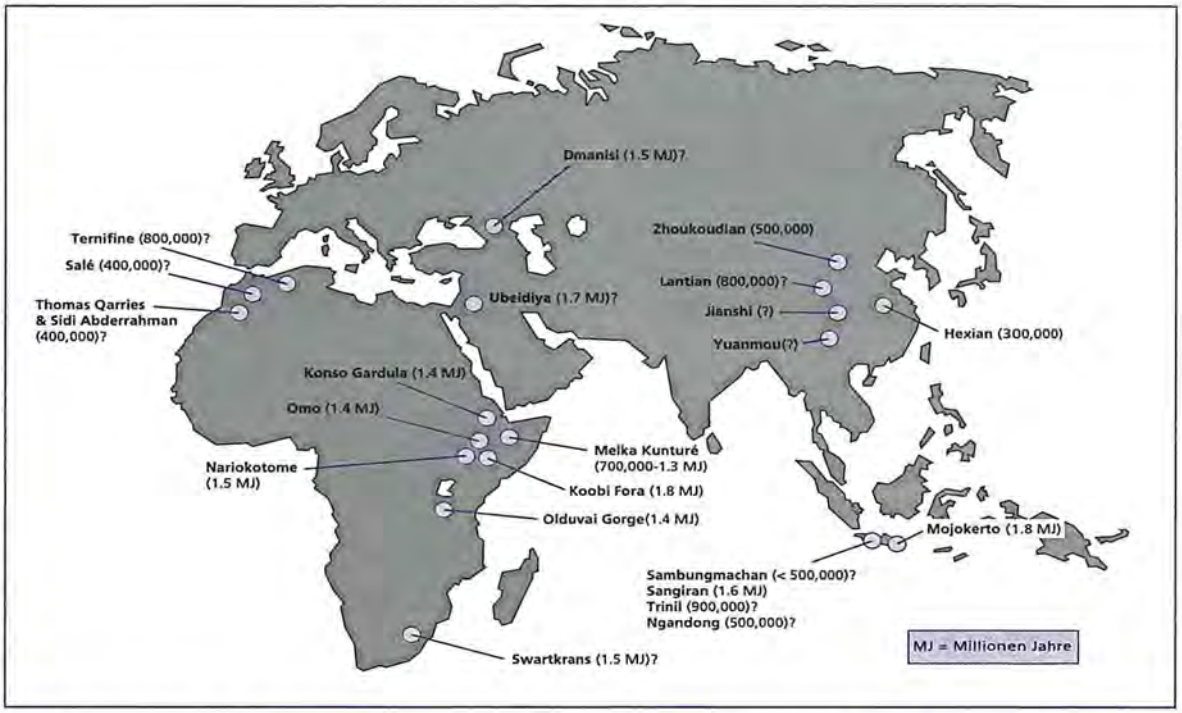


Abb. 2: H. erectus-*Fundstellen mit entsprechendem geologischen Alter (gemäß klassischer Datierung). Während man bis 1994 annahm, daß die ältesten Formen von Afrika kamen, ergaben Neudatierungen von Javanischen* H. erectus-*Fossilien ein mindestens gleich hohes Alter. Beachte, daß ähnlich alte* H. erectus-*Fossilien nicht nur in Südostasien und Afrika, sondern womöglich auch im Nahen Osten vorkamen.*

schen Funde jünger als eine Million Jahre seien. Alle Datierungen außerhalb Afrikas, die die Millionengrenze überschritten, standen auf relativ schwachen Beinen und wurden verworfen.

Neue Datierungen aus Ost- und Südostasien deuten jedoch auf eine sehr frühe Besiedlung Asiens hin – viel früher, als man bisher annahm. In Java wurden mittels Kalium-Argon-Datierungsmethoden Schichten, aus denen das Modjokerto-Kind *(H. erectus)* geborgen wurde, auf 1,8 Millionen Jahre neu datiert (Swisher III et al. 1994). Obwohl Curtis in den 60er Jahren ein ähnlich hohes Alter vorgeschlagen hatte, wurden seine Ergebnisse als problematisch angesehen, da die Kalium-Armut der zu datierenden Schichten dazu zwang, sehr viel Substrat aufzuarbeiten, wodurch mit hohen Fehlerquoten zu rechnen ist. Durch die neue, an zwei Stellen wiederholte Datierung *erectus*-führender Schichten werden die südostasiatischen *H. erectus* Funde genauso alt wie die ältesten aus Afrika. Man könnte diesen Befund einmal als Bestätigung werten, daß es sich bei den afrikanischen und asiatischen Formen nicht um eine, sondern um zwei Arten handelt: *H. ergaster* (Wood 1992) und *H. erectus*. Ob getrennte Arten oder nur unterschiedliche Populationen – beide Formen sind ab 1,8 Millionen Kalium-Argon-Jahren offensichtlich getrennte Wege gegangen. Falls sie auf eine gemeinsame afrikanische Stammform zurückgehen, hat die spätere asiatische Form Afrika vor der Erfindung der Faustkeile verlassen, was das bisher unverstandene Fehlen dieser Steinwerkzeuge in Ost- und Südostasien erklären würde. Auf der anderen Seite könnten asiatische und afrikanische Form genausogut außerhalb Afrikas entstanden sein. Wenn man einen 1,8 Millionen Jahre alten *H. erectus* in Afrika und einen gleichalten in Südostasien hat – was liegt näher, als das Entstehungszentrum irgendwo dazwischen zu suchen? 1982 berichteten Repenning & Fejfar (1982) über eine etwa zwei Millionen Jahre alte *erectus*-führende Schicht in Ubeidiya, Israel. Auch wenn diese Datierung nicht unbestritten blieb, wird der Nahen Osten als Ausbreitungszentrum und Ort der Entwicklung – nicht nur für *Homo sapiens,* sondern auch für *H. erectus* – vermehrt in Erwägung gezogen.

Literatur

Bowcock AM, Ruiz-Linares A, Tomfohrde J, Minch E, Kidd JR & Cavalli-Sforza LL (1994) High resolution of human evolutionary trees with polymorphic microsatellites. Nature *368,* 455-457.

Bräuer G (1984) Präsapiens-Hypothese oder Afro-europäische Sapiens-Hypothese? Z. Morphol. Anthropol. *75,* 1-25.

Bräuer G (1992) Africa's place in the evolution of *Homo sapiens.* In: Bräuer G & Smith FH (ed) Continuity or Replacement: Controversies in *Homo sapiens* Evolution (pp. 83-98). Rotterdam: Balkema.

Cann R, Stoneking M & Wilson A (1987) Mitochrondrial DNA and human evolution. Nature *325,* 31-36.

Chen T, Yang Q & Wu E (1994) Antiquity of *Homo sapiens* in China. Nature *368,* 55-56.

Foley RA & Lahr MM (1992) Beyond „out of Africa": reassessing the origins of *Homo sapiens.* J. Hum. Evol. *22,* 523-529.

Li T & Etler D (1992) New Middle Pleistocene hominid crania from Yunxian in China. Nature *357,* 404-407.

Maddison DR (1991) African origin of human mitochondrial DNA reexamined. Syst. Zool. *40,* 355-363.

Repenning CA & Fejfar O (1982) Evidence for earlier date of 'Ubeidiya, Israel, hominid site. Nature *299,* 344-347.

Stringer CB (1991) Die Herkunft des anatomisch modernen Menschen. Spektrum d. Wiss. S. 112-120.

STRINGER CB & ANDREWS P (1988) Genetic and fossil evidence for the origin of modern humans. Science *239*, 1263-1268.

SWISHER III CC, CURTIS GH, JACOB T, GETTY AG, SUPRIJO A & WIDIASMORO (1994) Age of the earliest known hominids in Java, Indonesia. Science *263*, 1118-1121.

TEMPLETON AR (1992) Human origins and analysis of mitochondrial DNA sequences. Science *255*, 737.

THORNE AG & WOLPOFF MH (1992) Multiregionaler Ursprung der modernen Menschen. Spektrum d. Wiss. *Juni*, S. 72-79.

WADDLE D (1994) Matrix correlation tests support a single origin for modern humans. Nature *368*, 452-455.

WILSON AC & CANN RL (1992) Afrikanischer Ursprung des modernen Menschen. Spektrum d. Wiss. *Juni*, S. 72-79.

WOLPOFF MH (1989) Multiregional evolution: The fossil alternative to Eden. In: MELLARS P & STRINGER C (eds): The Human Revolution. Behavioural and Biological Perspectives on the Orignis of Modern Humans (pp. 62-108). Edinburgh: Edinburgh University Press.

WOLPOFF MH & THORNE AG (1991) A case against Eve. New Scientist *130*, 1774, *June*, 22, 37-41.

WOOD BA (1992) Origin and evolution of the genus *Homo*. Nature *355*, 783-790.

Hinweise zur kontroversen Diskussionslage in der heutigen Kosmologie[1]

Horst W. Beck, Sommerhalde 10,
D-72270 Baiersbronn

Norbert PAILER hat mit den Titeln „Neues aus der Planetenforschung" und „Geheimnisvolles Weltall" (PAILER 1994a; 1994b) beeindruckend gezeigt, wie die jüngste Beobachtungsdatenlage der Astronomie und Astrophysik, von unserem Sonnensystem angefangen bis zu den nahen und fernstvermuteten Galaxien, das Weltall ziemlich rätselhaft erscheinen läßt. Generell kann man sagen, daß die neuere Datenlage ein klares Raum-Zeit-Bild unseres Universums derzeit nicht zuläßt.

Der schwedische Nobelpreisträger für kosmische Plasmaphysik, Hannes ALFVÉN, hat vor einigen Jahren auf der Nobelpreisträgertagung in Lindau die erstaunten Teilnehmer aufgefordert: Man sollte im Augenblick mit der Behauptung und der Verfechtung bestimmter kosmologischer Modellvorstellungen pausieren und die überraschenden Daten der Weltraumforschung auswerten. Viel Neues wäre zu erwarten. In der Tat!

Wie alles derzeit in Fluß kommt, demonstriert ein die Fachwelt herausforderndes Buch des heute am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching arbeitenden Halton C. ARP in exemplarischer Weise. Im folgenden ist eine knappe Skizze der ARPschen Intention geboten.

Halton ARP, inzwischen das „enfant terrible" unter den Astrophysikern und Kosmologen, hält seit einem Vierteljahrhundert die Fachwelt in Atem mit Meßdaten über Galaxienstrukturen, Quasare und sonstige intergalaktische Materiebrücken, die in das konventionelle Expansionsbild des Materiekosmos nicht mehr passen. An seinem persönlichen Weg in der Zunft der Astrophysiker wird das Konventions- und Weltanschauungsproblem in der Kosmologie drastisch beleuchtet.

In *Quasars, Redshifts, and Controversies* (ARP 1987) gibt ARP einen ungeschminkten Einblick in den gegenwärtigen kontroversen Diskussionsstand in der Kosmosphysik. Zwei Absichten verfolgt ARP mit dem herausfordernden Buch: Erstens neue Erkenntnisse der Astrophysik, für die eine starke Evidenz aus den Beobachtungsdaten besteht, über Fachpublikationen hinaus bekannt zu machen. Zum zweiten ist der ethische Apell an die Fachwelt markig: Verdrängt nicht unerwartete Beobachtungsevidenzen und seid bereit, eingewöhnte Konventionen zu revidieren! Das Buch war auch deshalb fällig, weil ARP und seine Gruppe an der Publikation der unpassenden Ergebnisse in Fachjournalen zunehmend gehindert wurden. An den großen Teleskopen wurden der ARP-Gruppe Schritt für Schritt Forschungsverantwortung und Benutzerzeiten beschnitten. Diesem Tatbestand widmet der Autor ein erhellendes Kapitel: „The Sociology of the Controversy" (S. 165-172). Der Physikhistoriker Thomas KUHN (1967) wird hier in seinem Urteil, der Fortschritt der Physik sei durch Paradigmenkämpfe in Wissenschaftlergemeinschaften erkauft, am drastischen Beispiel glänzend bestätigt. In der Kosmologie wird die Weltanschauungsgebundenheit besonders eklatant. Respekt vor der anspruchsvollen Materie und den erlauchten Fachleuten darf nicht hindern, ein eigenes Urteil unter Wahrnehmung der Kontroversen zu finden. Insoweit sind wir ARP dankbar, daß er den Weltanschauungsstreit über den Urknallglauben als Forschungsbeteiligter aus erster Hand öffentlich macht.

Das Anliegen ARPs sei knapp skizziert und kommentiert:

a) Seit 1924 hat Edwin HUBBLE demonstriert, daß die Strahlungsspektren der Galaxien, als riesige Sternhaufen erkannt, in Abhängigkeit von ihrer 'scheinbaren Helligkeit', die als indirektes Maß für

ihre Entfernung gilt, rotverschoben sind. Schnell hat sich gegen deutliche Vorbehalte HUBBLES[2] die Doppler-Effekt-Deutung durchgesetzt: Der Kosmos expandiert. Die Rotverschiebung ist umso stärker, je weiter sich das strahlende Objekt mit höherer Expansionsgeschwindigkeit vom Beobachter entfernt. Die Grundthese von ARP ist, daß seit 1966 Beobachtungen mit wachsender Evidenz dieses naive Bild widerlegen. Die Leuchtkraft bzw. -schwäche eines kosmischen Objektes kann kein direktes Zahlenmaß für die Entfernung sein. Das später nach HUBBLE benannte „Gesetz" zwischen Leuchtkraft, gedeutet als Entfernungsindiz und Rotverschiebung, das durch die FRIEDMAN-ROBERTSON-WALKER-Gruppe zu einer Expansionslösung der EINSTEINschen Gravitationsgleichungen geführt hat, ist kein kosmisches „Gesetz"![3] Radio-Galaxien, Quasare, Galaxienhierarchien und -gruppen, Eigen- und Fremddynamik der Galaxien, intergalaktische Partikel- und Gasverteilungen sind weitgehend unverstanden.

Die neuen Beobachtungstatbestände sind nicht zufällige Ausreißer, sondern brechen als fundamental geglaubte „Gesetze" systematisch.

ARP bemüht sich aufzuweisen, daß die neuen Beobachtungstatbestände nicht zufällige Ausreißer, übergehbare Anomalien sind, sondern als fundamental geglaubte „Gesetze" systematisch brechen. Radioastronomie und Quasarverhalten waren ein Schock für die Standardtheorie.[4]

b) ARP begleitet seine Darstellung der Beobachtungstatbestände mit der leidenschaftlichen Frage: Warum verdrängen so viele Fachleute solch klare Evidenzen? Was ist los mit der Astronomie und Kosmologie, wenn man übliche Standards wissenschaftlicher Forschung und Erkenntnisgewinnung verneint? (ARP 1987, 4f.)

c) Die Entfernung der Quasare kann weder aus der Strahlungsintensität noch aus der Rotverschiebung erschlossen werden. Dazu wird der statistische Nachweis anhand zureichender Photoplattenauswertungen geführt, daß Quasare in einem „physikalischen" Verbund mit Muttergalaxien sind. Sie werden in Galaxien geboren und teilweise herausgeschleudert (S. 10). Galaxien mit mehreren Quasaren sind ausreichend nachgewiesen. Quasare haben von den Stammgalaxien drastisch unterschiedene Rotverschiebungsgrößen, die eine überraschend klare Periodizität aufweisen (S. 14, Table 1-2).

d) Quasare sind nicht zufällig im Verbund von Mutter-Tochter-Galaxien verteilt (S. 25, Fig. 2-4). Ihre Geburtsgeschichte und Verteilung hängt eng mit der Geschichte der Stammgalaxiengruppe zusammen.

e) Die Auswertung von Photoplatten zeigt eine durch Materiebrücken sichtbare Verbindung von Stammgalaxien und Quasaren (S. 31ff.). Dahinter verbirgt sich wahrscheinlich ein Explosionsszenario der Bezugsgalaxie (S. 58ff.).

f) Das sog. Hubble-Gesetz als eine eindeutige Korrelation zwischen Strahlungsintensität/Entfernung und Rotverschiebung ist für Quasare vollständig widerlegt: Quasare mit hoher Rotverschiebung ($z \approx 2$) haben die schwächste Eigenstrahlung. Starkstrahler mit kleinerer Rotverschiebung sind offenbar die uns nächsten Quasare. ARP stellt in einem Diagramm (Redshift-Apparent Magnitude) alle besprochenen Galaxien- und Quasarbeispiele zusammen: das Ergebnis ist eine *empirische* Widerlegung des konventionellen Hubble-Diagramms (S. 175, Fig. 11-1). Die systeminternen quantisierten Rotverschiebungen lassen sich nicht mit dem Konzept eines expandierenden Universums versöhnen.

g) In physikalisch (gravitations- und magnetodynamisch) gebundenen Galaxiengruppen wird eine erstaunlich präzise Quantisierung der Rotverschiebungswerte der Compagnon-Galaxien (Mutter-Tochter-Galaxien) gemessen. Die Werte streuen gering um scharfe Mittelwerte (72 / 144 / 216 / 288 km/sec^{-1}-Quasigeschwindigkeit für Rotverschiebung). Dies kann für unsere Galaxie, die lokale Gruppe, und entfernte Galaxiengruppen bestätigt werden. Die scharfe Periodisierung/Quantisierung beweist, daß die Dominanz der Rotverschiebung kein kosmologischer Effekt (Fluchtgeschwindigkeit) sein kann. Damit ist die Entfernung der Galaxiengruppen auch hinsichtlich ihrer Leuchtkraft ungeklärt. Die *Makroquantisierungen* der Spektren wirft die Frage nach der Korrelation mit den *Mikroquantengesetzen* und damit nach ihrer Ursprungskausation auf (S. 104). Einige Wissenschaftler werfen sogar die Frage auf, ob die relativistischen Gravitationsgesetze, wie sie für unser Planetensystem bewährt sind, auch im Horizont der kosmischen Skalen der Galaxiendispositionen gelten (J. BEKENSTEIN, M. MILGROM, R. SANDERS; in: ARP 1987, S. 104).

h) Galaxien erweisen sich als *lebendige* Gebilde: Muttersysteme zeugen und gebären Töchter. ARP zeigt dies an überzeugenden Ejektionsgebilden: Ketten von Tochtergalaxien mit gestaffelten Rotverschiebungsgrößen. Dabei erscheinen in Wasserstoffwolken eingebettete Quasare, z. T. im Hochfrequenzbereich (Röntgen-Gammastrahlung), als Begleitphänomene der Sternbildungsprozesse. Beim Geburtsvorgang wird Materie der unterschiedlichsten Zustandsformen (Material im Radio-, Röntgen/Gamma-Strahlungsbereich) ausgeschleudert. Der spezielle Ejektionsprozeß formt

die Milchstraßengruppe mit den Übergangsmaterialien: Spiral- und Ellipsenformen, Gas- und Partikelströme, Quasare. Der Astronom bzw. Astrophysiker sieht sich vor der Aufgabe, gigantisch-komplexe, quasilebendige astronomische Gebilde zu interpretieren. Diese physikalisch zu einem Beobachtungstyp gebundenen astronomischen Einheiten repräsentieren in sich die Spannweite der quantisierten Rotverschiebungsgrößen. Diese können damit nicht kosmisch sein und erfordern eine systemspezifische Deutung: ARP vermutet eine strenge Korrelation der partiellen Rotverschiebungsgrößen der Teilsysteme – Wasserstoffwolken, Quasare, Tochtergalaxien – mit Jugend oder Alter im Gruppensystem. Dabei bleibt die nichtkosmische Kausation zunächst offen.

i) ARP diskutiert theoretische Erklärungsansätze der neuen Situation. Er bevorzugt den Baconschen Weg der Interpretation des Beobachtungsmaterials, ohne sich an die konventionellen Überzeugungen zu binden (S. 178f.). Deutlich wird, daß Ad-hoc-Erklärungen im Standardbild etwa mit gekünstelten magnetischen Linsen vor allem die Diskordanzen und Perioden der Spektrenverzerrungen nicht erklären. Theorien, die eine Ermüdung des Lichtes durch Gravitation oder Teilchenkollisionen für die Rotverschiebung bemühen, sind für ARP respektabel, aber für die diskrete Quantisierung nicht greifend. Oder sind sog. Schalen- bzw. Schirmtheorien zielführend, die zwischen Quelle und Empfänger strukturierende Übergangsschwellen für die Periodisierung postulieren? (S. 180) Der Ausstoß von Materie aus Galaxienkernen ist eine tatsächliche Beobachtung. Sind „Schwarze" bzw. „Weiße Löcher" die Ausstoßherde? Nach Fred HOYLE ist ihre Grenze eine „zero mass surface" (Nullmassenoberfläche), die einmal die Thermalisierung einer austretenden Photonenstrahlung als einer isotropen Hintergrundstrahlung bedingt, als auch den Ausstoß spezifisch strukturierter Jungmaterie deuten könnte (S. 182). ARP vermutet die Ursachen für die Rotverschiebung der Strahlung dieser neugeborenen Jungmaterie durch einen „Massendefekt". Atome mit solchem Massendefekt, d.h. mit geringerer Eigenfrequenz, emittieren entsprechend quantisiert rotverschobene Photonen ($E_{ph,d} = h * \nu_d = m_d * c_2$; ν_d = Verschobene Frequenz; m_d = Defektmasse). Der Massendefekt soll sich im Horizont des Lichtkegels ausgleichen.[5]

j) Die periodische Quantisierung der Quasar- und Galaxienrotverschiebungen wird aus Quantenbedingungen der stetigen Materieejektion aus den maximal raum-zeit-gekrümmten Geburtsherden (Schwarze, Weiße Löcher) der Galaxienzentren vermutet. ARP vertritt eine Art „little bang-Theorie" der über den Materiekosmos verteilten Geburtslöcher. Es ist eine neugeformte *steady state-Theorie*.[6] Hypothetisch wird angedeutet: Materie könnte aus einem anderen Universum in „unseres" tunneln.

Kritik am Urknallbild des Bonner Astrophysikers FAHR (1992) markiert in ähnlicher Stoßrichtung die bewegte Situation. Die Ergebnisse von ARP und FAHR zeigen etwa an der Unsicherheit der Deutung der Rotverschiebung, der Hintergrundstrahlung, der Elementenverteilung sowie am Mangel des Verständnisses der Strukturen in kosmischen Skalen, daß die seit 1986 in der Arbeitsgruppe Physik/Kosmologie der Studiengemeinschaft Wort und Wissen diskutierte Wandlung und Charakteristik kosmischer Basisgrößen (Lichtgeschwindigkeit, Rotverschiebung, Helle und Dunkle Materie, Dunkle Materie als gravitierende 'Schattenwelt' u.a.m.) weiter ein aktuelles Thema ist.

Weiter ist zu bedenken:

(1) Auf göttliche Schöpfungsakte ist Physik und verobjektivierende Wissenschaft nicht anwendbar: Ein Gegenstandsraum, der erkenn- und erfahrbar ist und damit auch wissenschaftlich kategorial beschreibbar und systematisierbar wird, entsteht erst durch grundgelegte Schöpfungsakte. Gottes Schöpfungshandeln kann nach dem gesamtbiblischen Zeugnis keinesfalls im deistischen Sinne auf den zeitlichen Ursprung eines Universums eingeschränkt werden. Das Psalmwort faßt die biblische Sicht: „Denn Er spricht, und es geschieht; Er gebietet, und es steht da" (Ps 33,9; vgl. Mk 1,41; Hebr 11,3).

Schöpfungstheologisch ist die gesamte Erfahrungswirklichkeit, wie sie auch im physikalischen Kosmosaspekt erkennbar ist, zu verstehen als die Summenwirkung göttlicher Gestaltungsakte. So ist das jeweilige Raum-Zeit-Kontinuum ein Zustandsprädikat des jeweiligen Materiegeschehens (VON WEIZSÄCKER 1986, S. 284).[7]

Gottes Schöpfungs-, Gerichts- und Erhaltungshandeln repräsentiert sich als Erfahrungswirklichkeit des Geschöpfes Mensch aus der Souveränität des göttlichen Handelns notwendigerweise *kontingent*. Aus dieser Sicht ist der Kosmos die Superposition aller strahlenden und atomaren Erscheinungen, deren Ursprung im Zeichen echter Kontingenz verborgen bleibt.

Der Kosmos als Ganzes
ist nicht „Natur",
vielmehr Schöpfung im bleibenden
Bezug zum Schöpfer.

(2) Erwägungen angesichts der Rätselhaftigkeit des Weltalls: In Jeremia 31,37 steht das Rätselwort: So spricht der Herr: So gewiß man den Himmel oben nicht ausmessen und den Grund der Erde unten nicht erforschen kann, so gewiß will ich Israel ob seiner Sünde nicht verwerfen. Verweigert uns fragenden Geschöpfen Gott der Schöpfer die Erfas-

sung des Schöpfungsalls? Sind wir auf der richtigen Erkenntnisfährte, wenn wir das Schöpfungsall in physikalischen Bildern bestimmter methodisch erzwungener Theorie- und Modellformen vorstellen wollen? Noch dazuhin in einer sog. Urknall-Standardvorstellung, die schließlich im Selektionskampf der Konkurrenten überlebt? Die skizzenhafte Darstellung der jüngsten Datenlage vermittelt eine Einsicht in die Offenheit und Grenze von Kosmologie als Naturwissenschaft. Der Kosmos als Ganzes ist eben nicht „Natur", vielmehr Schöpfung im bleibenden Bezug zum Schöpfer.

Die gestreifte Theorie- und Datenlage führt gewiß nicht zu einer integrierenden Gesamtschau, zumal der beobachtende Mensch sich seiner Erkenntnisstellung bewußt bleiben muß. Verschärft gilt, was alle wissenschaftliche Erkenntnis bricht: Der Mensch erkennt nur im von ihm selbst projektierten Modell- und Theoriebild. Das sog. Modelloriginal, die Wirklichkeit an sich, ist im Horizont kosmologischen Fragens prinzipiell unerreichbar. Das biblische Wort mahnt: Mathematische Raum-Zeit-Kräftebilder des Alls könnten bei aller Stimmigkeit und logischer Eleganz Hybris sein. Zudem ist für den wissenschaftenden Menschen *post lapsum,* im Äon nach dem Sündenfall, in den physikalisch-biologischen „Gesetzen" die Fallsgestaltigkeit manifest. Dies setzt Konditionen für das Fragen. Die zeitlich-räumlich-lokale Gegenwart ist niemals Maß für den Raum-Zeit-Horizont von Vergangenheit noch für denkbare Zukünfte. Dies tangiert nicht zuletzt sog. „Natur"konstanten.

Anmerkungen

[1] Zur Problematik einer 'wissenschaftlichen' Kosmologie im Horizont Biblischer Schöpfungsoffenbarung vgl. Beck (1994), Teil III, S. 422-514.

[2] Segal et al. (1991) zitieren Hubble in seiner Zurückhaltung (S. 291): „The assumption that redshifts are not velocity shifts is more economical and less vulnerable, except for the fact that, at the moment, no other satisfactory explanation is known." Vgl. den Hinweis bei Thüring (1985, S. 110).

[3] Wir haben hier eine vergleichbar revolutionäre Situation wie in der Biologie: Dort wurde über Generationen seit E. Haeckel das sog. „biogenetische Grundgesetz" als ein tragendes Grundgesetz der Biologie überhaupt gepflegt. Es erweist sich aber als im Erklärungstyp wertlos und weltanschauungsgebunden. In der Kosmologie verschwindet ein weltbildtragendes „Gesetz" durch die Diskordanz mit der Beobachtungsrealität.

[4] Arp (1987, 2): „The first shock to conventional theory came with the advent of radio astronomy and the discovery of quasars." Abertausende von kosmischen Radioquellen wurden entdeckt: Radiostrahlung wird durch in Magnetfeldern bewegte geladene Partikel verursacht und repräsentiert einen wesentlichen Strahlungsanteil der Galaxien. So verschwinden einfache Bilder der Galaxienstrukturen. Die mysteriöseste Klasse von Radioquellen sind die sog. Quasare. Optisch sehen sie wie Punktquellen aus, wie Sterne: „Quasi-Sterne". Der Schock war ihre im Vergleich zu den Galaxien über 1000fache Rotverschiebung und ihr Energieausstoß. Schnell hat man sie deshalb an den äußersten Kosmosrand verdrängt als die Geburtsobjekte des materiellen Kosmos. Was sind sie wirklich?

[5] Zur Hoyle-Narlikar-Theorie vgl. Arp (1987, 180 und 185; dort Literaturangaben). Arps Erwägungen sind eine Wiederbelebung der „Steady State Theory" von Hoyle, Bondi & Gold (1948).

[6] Die in „Quasars, Redshifts, and Controversies" dargebotenen Ergebnisse und Theorieansätze Arps sind nach weiteren Publikationen der Arp-Gruppe so gründlich bestätigt worden, daß die Fachwelt sie nicht mehr übergehen kann. Vgl. Arp et al. (1990a). In diesem Artikel wurden durch Auswerten der bis dato vorhandenen Quasarkataloge systematisch die Rotverschiebungen in allen Himmelsrichtungen getestet. Die Forscher zeigen, daß, wenn man die Ergebnisse aus allen Himmelsregionen überlagert, für das gefundene Periodengesetz $z = 0{,}30; 0{,}60; 0{,}96; 1{,}41; 2{,}7; 3{,}5$, die Vertrauensgröße des Korrelationswertes sich zu 99,97% ergibt. Damit ist mit statistischer Evidenz ein Zufallsdatengebilde ausgeschlossen. Vgl. weiter: Arp et al. (1990b). – Zur systematischen Verteilung der Galaxien vgl. Broadhurst et al. (1990).

[7] In dieser Richtung votieren im übrigen alle quantenkosmologischen Ansätze, die unseren Kosmos als spezielle Lösung universaler Quanten-Wellengleichungen deuten (Tipler 1994; Gell-Mann 1994).

Literatur

Arp HC (1987) Quasars, Redshifts, and Controversies. Berkeley, CA.

Arp HC, Bi HG, Chu Y & Zhu X (1990a) Periodicity of quasar redshifts. Astronomy and Astrophysics *239,* 33-49.

Arp HC, Burbidge G, Hoyle F, Narlikar JV & Wickramasinghe NC (1990b) The extragalactic Universe – an alternative view. Nature *346,* 807-812.

Beck HW (1994): Urknall und Schöpfung. In: Biblische Universalität und Wissenschaft – Interdisziplinäre Theologie im Horizont Trinitarischer Schöpfungslehre. Gustav-Siewerth-Akademie Weilheim.

Broadhurst TJ, Ellis RS, Koo DC & Szalay AS (1990) Large-scale distribution of galaxies at the Galactic poles. Nature *343,* 1990, 726-728.

Fahr H (1992) Der Urknall kommt zu Fall. Stuttgart.

Gell-Mann M (1994) Das Quark und der Jaguar. München.

Kuhn TS (1967) Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt.

Pailer N (1994a) Neues aus der Planetenforschung. Neuhausen.

Pailer N (1994b) Geheimnisvolles Weltall. Neuhausen.

Segal IF, Nicoll JF, Wu P & Zhou Z (1991) The Nature of the Redshift and Directly Observed Quasar Statistics. Naturwissenschaften *78,* 289-296.

Tipler FJ (1994) Die Physik der Unsterblichkeit. München – Zürich.

Thüring B (1985) Methodische Kosmologie. Frankfurt.

von Weizsäcker CF (1986) Der Aufbau der Physik. München.

WELTRAUMTELEGRAMM

von Norbert Pailer

Der Kometencrash

Einschläge im Planetensystem sind altbekannte Phänomene. Die vernarbten Planeten- und Mondoberflächen sind davon beredte Zeugen. Zum ersten Mal in der Geschichte der Astronomie war diesmal jedoch ein einschlagendes Objekt lange im voraus beobachtbar und der Einschlagsvorgang selbst – mit gewissen Einschränkungen – direkt einsehbar. Die Einschlagsstelle der Kometenbruchstücke befand sich 5 - 10° hinter dem von der Erde einsehbaren Bereich (vgl. Abb. 1).

Wissenschaftler, die sich ein Leben lang mit Einschlägen im interplanetaren Raum beschäftigen, redeten vom aufregendsten Ereignis ihres Lebens. „This kind of thing occurs once every thousand or even 10.000 years. Even to be alive when it's happening is special . . . Each (of the 21 pieces') entry will create a tunnel of fire the size of Mexico, as the chunk of cosmic matter flattens like a pancake, falls apart and explodes . . . We've never seen anything hit a planet that is even as big as a house. Several of the Shoemaker-Levi 9 chunks will be as large as small mountains" (FOLEY 1994). „For the solar system, it might be the most impressive event of the last thousand years," sagt einer der Entdecker Gene LEVI in der oben genannten Quelle. Um einen Eindruck bezüglich der gewaltigen Energien zu geben, sei George RIEKE von der University of Arizona zitiert: „Fragment G (man hat die Bruchstücke nach dem Alphabet geordnet) alone propelled a fireball thousands of kilometers above Jupiter's stratosphere and is thought to have yielded at least six

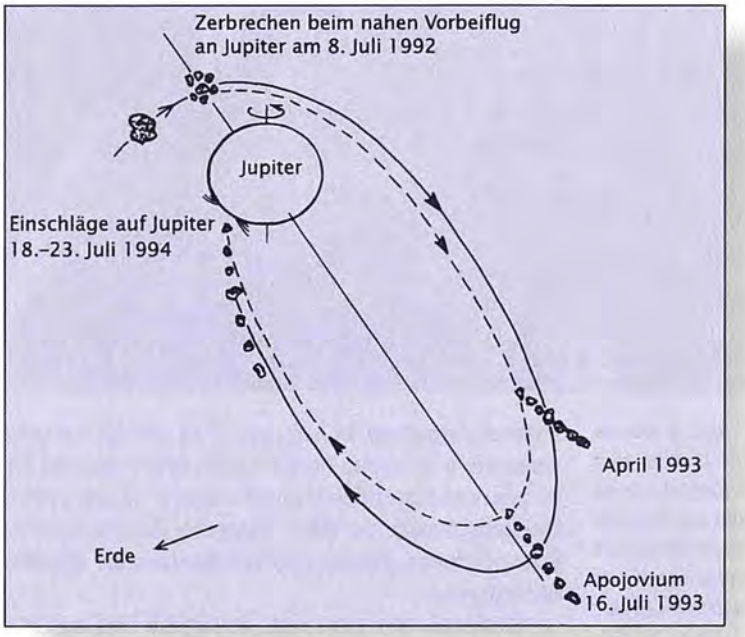


Abb. 1: Der am 25. März 1993 entdeckte Komet soll bereits seit 20-100 Jahren Jupiter umkreist haben, bevor er im Juli 1992 aufbrach. Der Mutterkörper wird auf 5-9 km im Durchmesser geschätzt. So kam eine „kometare Perlenkette" von 21 Bruchstücken auf Kollisionskurs mit dem Jupiter. Erste Ankunft: 16. Juli 1994, 21 Uhr MESZ.

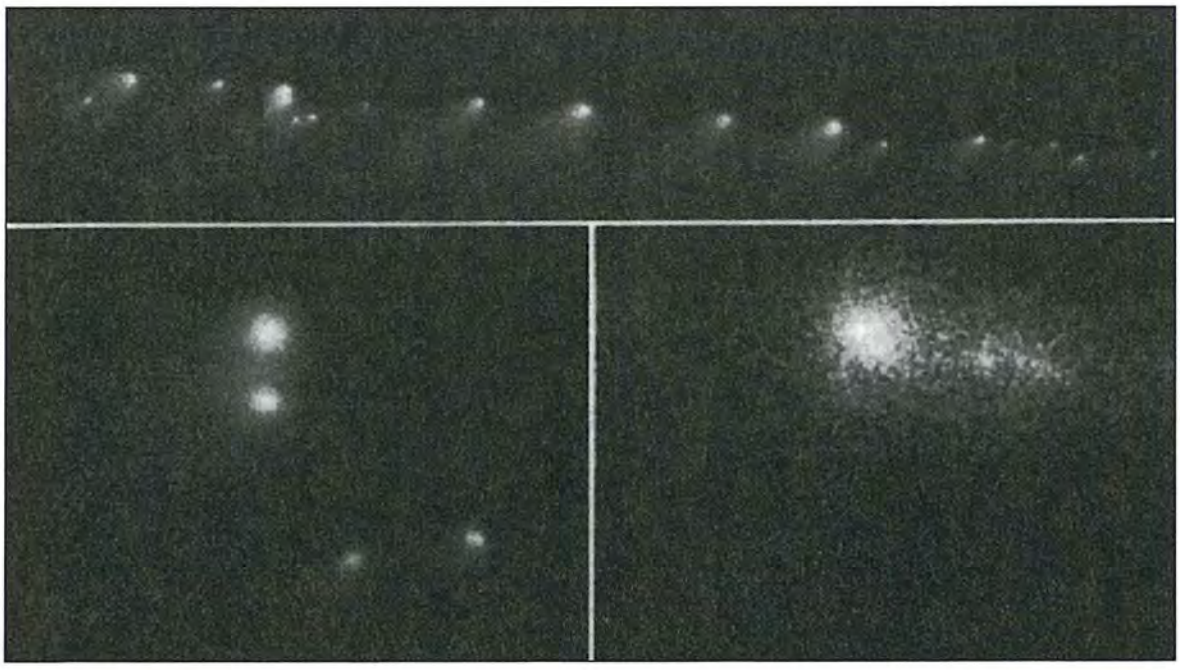


Abb. 2: Einzelheiten der „kometaren Perlenkette", teilweise mit dem reparierten Hubble Space Telescope aufgenommen. (Space Telescope Science Institute)

Abb. 3: Dieses Apollo 12-Bild zeigt eine Kraterkette im nördlichen Teil des Mare Nubium in Richtung auf den 35 km großen Krater Davy. (NASA)

million megatons of energy. One would have to detonate a Hiroshima-type bomb every second for 10 years to expend that much energy" (RIEKE 1994). Deshalb waren an dem Vorgang Atombomben-Konstrukteure gleichermaßen interessiert wie die Astronomen.

Dennoch war man sich bezüglich des spektakulären Charakters des Vorgangs für die interessierte Öffentlichkeit nicht ganz im klaren. Denn in der Astronomie hat man mit einigen groß angekündigten Ereignissen einige Pleiten erlebt: die Kometen Kohoutek 1974 und Halley 1986 oder der Sternschnuppenschwarm der Perseiden 1993.

Aber am 16. Juli war es dann klar: Hier geht ein riesiges Feuerwerk ab. Das Fragment A hat im 2,3 mm Wellenlängenbereich einen Explosionsblitz ausgelöst, der heller war als der Jupitermond Io. Die erzeugten Gaspilze sind einige hundert Kilometer über Jupiters Horizont geschleudert worden.

Wie alles begann. Im März 1993 wurde der Komet Shoemaker-Levi 9 (SL9) in einer Umlaufbahn um Jupiter entdeckt. Ein paar Monate später hat Brian MARSDEN vom Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts, ermittelt, daß der Komet bis auf 95.000 km an das Massenzentrum von Jupiter herankam, wo die Gravitationskräfte stark genug sind, um das Objekt in Bruchstücke zu reißen. Abb. 2 zeigt Einzelheiten der Bruchstücke, die man mit Hilfe des Hubble Space Telescope als „kometare Perlenkette" aufs Bild brachte. Beim nächsten Umlauf schrumpfte der Abstand auf etwa 30.000 km, was bei einem Radius von Jupiter von etwa 71.000 km heißt, daß das ganze Gebilde mit dem Gasplaneten Jupiter zusammenstößt. Abb. 1 zeigt die entsprechenden Bahnverhältnisse.

Vor seiner Gezeitenspaltung war SL9 ein so finsteres Objekt, daß es einer gezielten Suche jupiternaher Kometen bislang entging, was bei dieser großen Sonnendistanz auch kein Wunder ist. Erst das Zerbrechen des Kerns, insbesondere der dabei freigesetzte, von der Sonne beschienene Staub, ließ ihn hell genug werden, um entdeckt zu werden. Da die Fragmente schnell nachdunkelten (die Staubwolke sich also bereits verkleinert hatte), entstand bald die Frage nach dem Verbleib von volatilen (leichtflüchtigen) Bestandteilen (s. u.).

Übrigens zeigen Arbeiten an der University of Hawaii, daß Kometen auch ohne Jupitereinfluß zerbrechen. Von 49 systematisch untersuchten Kometen offenbarten gleich drei einen Begleiter. Aus diesem Anteil läßt sich schließen, daß es pro Komet im Mittel alle hundert Jahre zur Abspaltung eines Fragments kommt, was seine Auflösung als Objekt zusätzlich zur sonst üblichen Staubfreisetzung beschleunigt. Deshalb haben wir aus heutiger Sicht drei unterschiedliche Vorgänge zu berücksichtigen, wenn die Lebensdauer von Kometen abgeschätzt wird:

- Zersetzung durch Freigabe von volatilen Elementen und Staub besonders in Sonnennähe,
- Aufspaltung von Kometenkernen auf dem Weg durch das Planetensystem,
- Zusammenstöße mit Planeten, deren Monden und Kometenstürze in die Sonne.

Erst die geschlossene Betrachtung oben genannter Vorgänge erlaubt die Ermittlung der Lebensspanne von Kometen. Die neueren Entdeckungen zeigen, daß frühere Abschätzungen der Lebensdauer nochmals zu verkürzen sind.

Einmalig an SL9 ist also nicht das Aufbrechen des Objekts. Es ist auch nicht der anschließende Zusammenstoß mit einem anderen Körper, denn wir kennen perlenkettenähnlich aufgereihte Kraterfolgen

Abb. 4: Dunkel gefärbte Einschlagstelle. (Space Telescope Science Institute)

auch auf den Jupitermonden Ganymed und Callisto. Selbst auf unserem Erdmond (Abb. 3) sind Spuren zu finden, die auf solche Ereignisse zurückgeführt werden. Das Besondere bei SL9 ist, daß aufwendige Beobachtungsprogramme mit Weltraumsonden und bodengestützten Teleskopen im voraus ausführlich zu planen waren und der Einschlagsvorgang selbst zu beobachten war.

Eigentlich erwarteten die Astronomen helle Wolkenpilze; stattdessen wurden dunkle Einschlagsstellen sichtbar. Man rechnete damit, daß helles Wasser- oder Ammoniakeis kristallisieren sollte, sobald sich der Feuerball abkühlte. Stattdessen war das kondensierte Material dunkel. Die erzeugten Strukturen wurden als die markantesten Phänomene auf Jupiter bezeichnet, seit Galileo 1610 zum ersten Mal Jupiter mit seinem Teleskop betrachtete. Abb. 4 zeigt beispielhaft eine auffällige Einschlagstelle.

Obwohl die Bruchstücke ähnlich groß waren, hatte jeder Einschlag seine eigene spektrale Kennung und einen unterschiedlichen Zeitverlauf. Dies läßt darauf schließen, daß die Bruchstücke ziemlich inhomogen waren. Aber die eigentliche Überraschung war, daß kein Wasser nachgewiesen wurde. Man ist der Auffassung, daß Kometen eine Art „schmutzige Schnellbälle" seien. Alexander DESSLER von der Rice University in Houston, Texas, stellte jedoch fest: „The snowball has no ice" (BENKA 1994). Es erhob sich die Frage, ob wir es mit SL9 tatsächlich mit einem Kometen oder eventuell mit einem Asteroiden zu tun haben. Wie hätte aber ein Asteroid auf diese Umlaufbahn geraten sollen? Heute ist das Verständnis eher so, daß man den Kometen SL9 für einen alten Kometen zu halten habe, der sein Eis bereits durch vorhergehende Sublimation verloren hatte und bei Jupiter eher als bereits „ausgebranntes Gerippe" ankam.

Literatur

FOLEY M (1994) Comet heads for collision with Jupiter. Aerospace America 3/94.

BENKA G (1994) Astronomers are poised for the crash of '94: Boom or bust? Physics Today, June 1994.

ULYSSES: No solar pole

Es war das erklärte Ziel der vor ca. 4 Jahren gestarteten Sonnenmission, zum ersten Mal die Polregionen der Sonne zu untersuchen. Dazu wurde Ulysses mit allen aufwendbaren Antriebsmitteln nach dem Aussetzen aus dem Shuttle-Nutzlastraum derart beschleunigt, daß er zum schnellsten von Menschen gemachten Objekt wurde. Mit Hilfe eines ausgeklügelten Anflugszenarios bei Jupiter wurde Ulysses derart aus der Ebene der Ekliptik (Bahnebene der Planeten) geschleudert, daß er im Sommer letzten Jahres über dem – nun wohl nicht existierenden – Südpol der Sonne zu fliegen kam. Die Flugroute ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Damit hat Ulysses die erste Phase seiner Primärmission erreicht. Die untersuchte Gegend sollte deshalb von besonderem Interesse sein, weil hier kosmische Teilchen und Strahlung ungehindert von außen in unser Planetensystem eindringen sollten.

Die Raumsonde erreichte am 5. November 1994 70° südliche Breite, um sich seither in einem Abstand, der dem der Sonne von der Erde entspricht, über den Äquatorbereich dem Nordpol der Sonne zu nähern. Sie soll den Überflug der Nordpolregion am 19. Juni 1995 beginnen.

So wie der arktische Bereich der Erde etwa 67° nördlich des Erdäquators liegt, so wurde über theoretische Arbeiten die Lage des Sonnenpols auf einer geographischen Breite von ca. 70° ermittelt. Abb. 2 zeigt das erwartete solare Szenario. Man beachte insbesondere die spiralförmigen Magnetfeldlinien

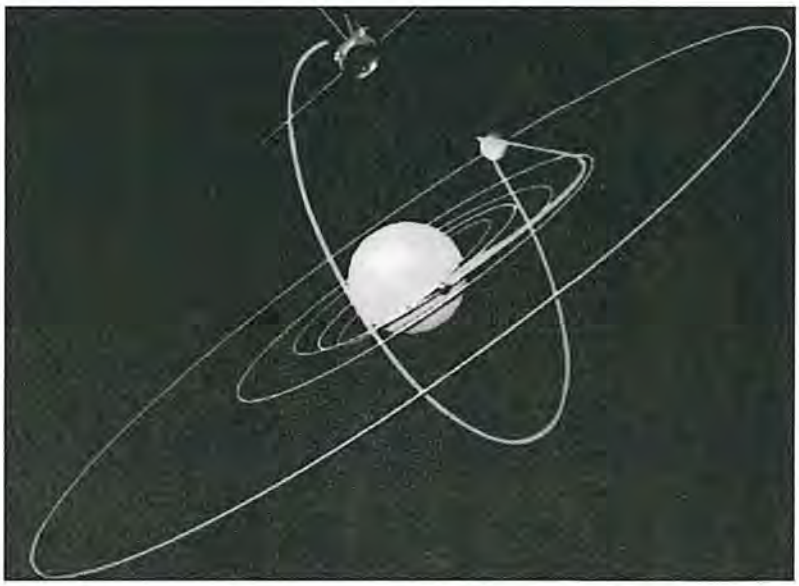


Abb. 1: Flugroute von Ulysses über Jupiter zum Sonnen-Südpol und -Nordpol; schematisch dargestellt. (ESA)

in der Äquatorebene und die gebündelten Magnetfeldlinien an den Sonnenpolen.

Doch die Meßdaten der Sonde warfen die Erwartungen über den Haufen: New Scientist, Sept. 1994, stellt fest: „Space scientists have been shocked to discover that the sun appears to have no south magnetic pole ... The field lines were expected to become more bunched and intense as the probe approached the south pole. Instead, the strength of the magnetic field remained absolutely constant."

Die offizielle Kurzmitteilung der NASA 94-187 kommentiert diese Entdeckung wie folgt: „The way that Ulysses sees the sun's magnetic field is very different from the way it is seen by observation from earth. Measurements from earth show the sun

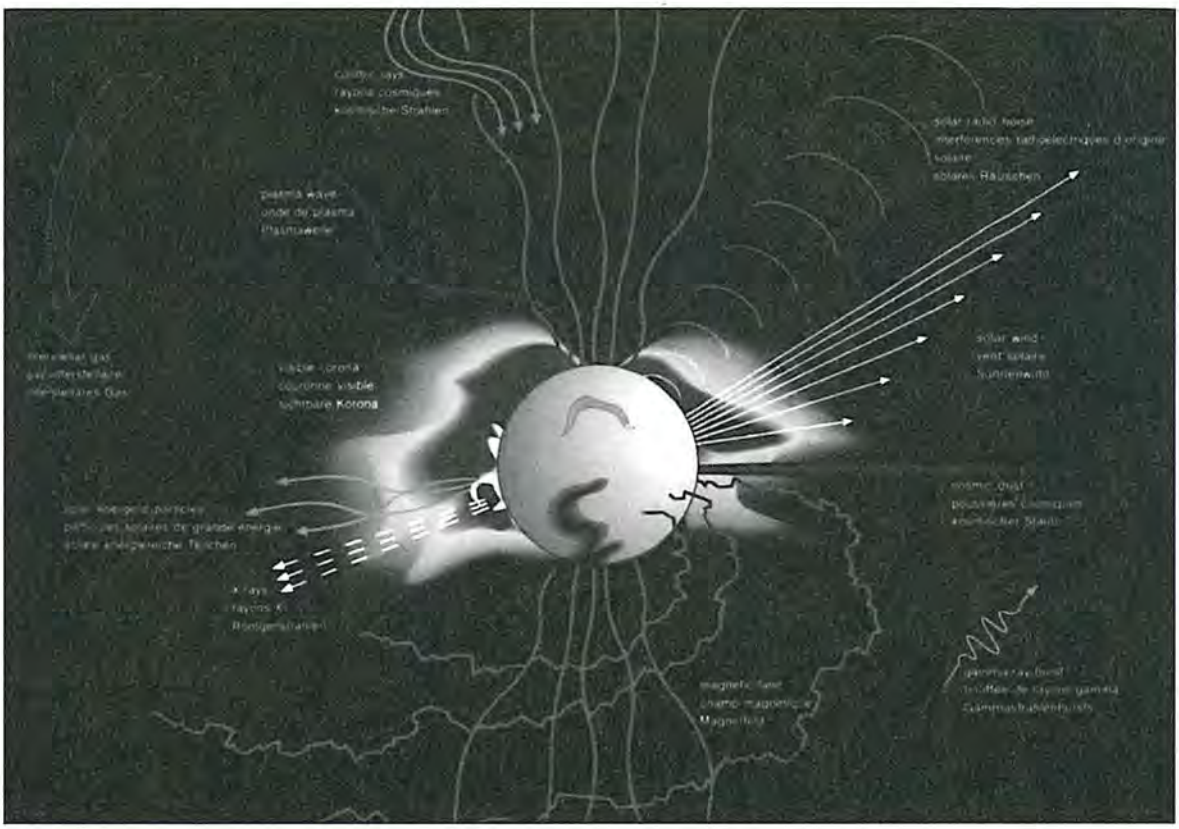


Abb. 2: Schema des erwarteten solaren Szenarios; man beachte insbesondere die ausgeprägten Polregionen. (ESA)

having a magnetic field with magnetic poles that are not the same as the sun's north and south poles; as the sun rotates, the magnetic poles go around. Ulysses, however, found a uniform magnetic field at the sun and did not detect any magnetic poles. Cosmic ray intensity in this high latitude region increased, but not nearly to the extent that scientists had predicted."

Weitere Überraschungen berichtet „Sterne und Weltraum" in der Ausgabe Dez. 94:

- Es war bekannt, daß der Sonnenwind über der „Polregion" mit rund 800 km/sec etwa doppelt so schnell ist wie in der Äquatorebene. Nun verblüffte, daß seine Quellregion auf der Sonne eine geringere Temperatur hat als die des äquatorialen Sonnenwindes.
- Über den Sonnenpolen gibt es keine Häufung von Teilchen kosmischer Strahlung aus dem interstellaren Raum. Man hatte erwartet, daß sich hier eine regelrechte Einflugschneise in unser Sonnensystem befinden würde; doch ein Anstieg des Flusses war nicht festzustellen: Die Heliosphäre schirmt auch über der „Polregion" gut ab.

Viele Monate wird es noch dauern, um aus den verwirrenden Einzeldaten ein neues Bild der Sonne und ihrer Umgebung zu formen und daraus wiederum Schlüsse über das Wesen solar-terrestrischer Beziehungen zu ziehen.

Literatur

MARSDEN R (1994) No solar pole. New Scientist *09/1994*. Kurzmitteilung der NASA zum Beflug der Polregion NASA 94-187

Brennpunkt „Sterne und Weltraum" 12/1994: „Ulysses – Überraschungen über dem Südpol"

Pulsar mit Planeten

„Es ist vollbracht. Die mehr als 100jährige Suche nach einem Planeten außerhalb des Sonnensystems hat ihr Ziel erreicht" (BASTIAN 1994). Mit diesen pathetischen Worten beginnt „Sterne und Weltraum 7/94" seinen Bericht über die mutmaßliche Entdeckung eines neuen Planetensystems in 1300 Lichtjahren Entfernung.

Der Millisekundenpulsar mit dem (unvergeßlichen) Namen PSR B1257+12 sendet Radiowellen aus. Wie das Leuchtfeuer eines Leuchtturms erreichen alle 0,0062 Sekunden entsprechende Pulse die Erde. Bereits vor zwei Jahren sind – wenn auch minimale – Schwankungen bekannt geworden. Sie lassen sich durch die Gravitationswirkung zweier den Neutronenstern umkreisende Planeten von wenigen Erdmassen erklären. Die Schwerkraft der beiden vermuteten planetaren Begleiter läßt den Pulsar ein wenig um den gemeinsamen Schwerpunkt des Gesamtsystems herumpendeln. Dies führt dazu, daß die vom Pulsar in ungeheuer regelmäßiger Folge abgegebenen Radioblitze um rund eine tausendstel Sekunde (!) verfrüht bzw. verspätet ankommen. Diese winzige Schwankung wird als Indiz für die Anwesenheit von Planeten gewertet. Aus der sinusförmigen Periodizität wurden ihre Umlaufzeiten von 66 und 98 Tagen abgeleitet. Ihre Massen liegen bei 3,4 bzw. 2,8 Erdmassen; die Bahnneigung beider Planeten ist wahrscheinlich nicht kleiner als 60° (ULBIG 1994).

Abb. 1: Der Stern ß-Pictoris mit seiner im Infrarot-Bereich angedeuteten Staubscheibe (aus PAILER 1994).

Mit dieser Erklärung werden Messungen gestützt, die man mit dem Infrarotsatelliten IRAS gemacht hat. Besonders bekannt geworden ist die „Staubscheibe" um ß-Pictoris mit einer Gesamtmasse von 1000 Erdmassen, die in Abb. 1 gezeigt wird (PAILER 1994). Im Mai 1991 gelang die Entdeckung silikatischer Konturen im Spektrum des Sternlichts (Abb. 2). Als Quelle für Staubteilchen in zirkumstellaren Scheiben werden Kometen diskutiert.

Die lange und intensive Suche der Astronomen hat damit wohl ihr Ziel zunächst erreicht: Es sind endlich Planeten in den Weiten des Alls gefunden worden. „Sie umkreisen jedoch keinen normalen Stern, sondern einen Millisekundenpulsar. Wenn es einen Ort gibt, an dem die Astronomen ganz bestimmt keinen Planeten erwartet hatten, dann in unmittelbarer Nähe einer Sternruine. Die Entwicklungsgeschichte dieser Objekte ist derart gewalttätig, daß ursprünglich vorhandene Planeten dadurch unweigerlich zerstört worden wären. Sie sind also im Gegensatz zu den kleineren Körpern, die unsere Sonne umkreisen, nicht mit ihrem Muttergestirn zusammen entstanden. Zumindest in diesem Sinne sind es also doch keine normalen Planeten. Ihre Entstehungsgeschichte muß sich fundamental von der unserer Erde und ihrer Geschwister unterscheiden" (BASTIAN 1994b).

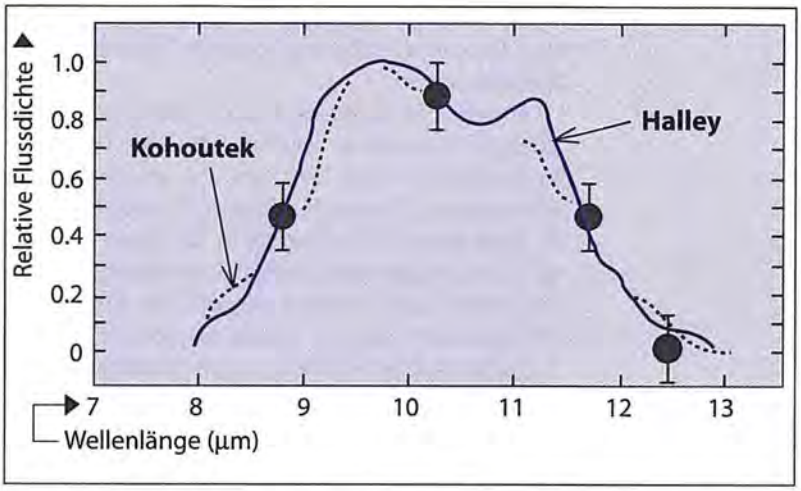


Abb. 2: Vergleich der relativen Flußdichte von ß-Pictoris (ausgefüllte Kreise) mit Spektren der Kometen Halley (durchgezogene Linie) und Kohoutek (gestrichelte Linie) (aus PAILER 1994).

Literatur

BASTIAN U (1994a) Pulsar PSR 1257 +12: Er hat wirklich Planeten. Sterne und Weltraum *7/94,* 510.

BASTIAN U (1994b) Die ersten Planeten außerhalb des Sonnensystems. Sterne und Weltraum *11/94,* 774-782.

PAILER N (1994) Neues aus der Planetenforschung. Neuhausen.

ULBIG S (1994) Pulsar mit Planetensystem: Entdeckung bestätigt. Physikalische Blätter *50/94,* 638.

Überraschungen bei Tiefbohrung

Im Oktober 1994 hatte die Kontinentale Tiefbohrung bei Windischeschenbach in der Oberpfalz das gesteckte Ziel erreicht: die Bohrphase wurde in genau 9.101 m Tiefe beendet. Im größten geowissenschaftlichen Forschungsprojekt der Bundesrepublik Deutschland wollte man bis zu der Tiefe vorstoßen, in der die Temperatur bei 300°C liegt; neben der Erkundung der Gesteinseigenschaften unter diesen Bedingungen sollten auch die Meßgeräte und die Bohrtechnik diesen extremen Verhältnissen entsprechend konzipiert werden. Nicht zuletzt versprach man sich mit der Beherrschung des technischen Know-how internationale Konkurrenzfähigkeit bei zukünftigen Projekten. Die bewilligten Finanzmittel für die Zeit von 1984 bis 1994 beliefen sich auf knapp 500 Millionen DM.

Zu Beginn der 80er Jahre waren vier Zielgebiete für eine Tiefbohrung in der Diskussion; ab 1983 konzentrierten sich die Untersuchungen auf den Schwarzwald und die Oberpfalz. Im Herbst 1986 entschied man sich schließlich für die Oberpfalz. Zunächst sollte eine Vorbohrung in 3-5 km Tiefe niedergebracht werden und ab 1989 wollte man in der Hauptbohrung bis in 14 km Tiefe vorstoßen. Im internationalen Vergleich wäre das ein Tiefen-Weltrekord gewesen, denn die bislang tiefste Bohrung auf der Kola-Halbinsel erreichte 12,2 km.

Mit dem Kontinentalen Tiefbohrprogramm (kurz: KTB) war bezweckt, die Nahtstelle zwischen zwei Kontinentblöcken, dem Soxothuringikum (Ur-Europa) und dem Moldanubikum (Ur-Afrika), zu

erforschen; nach plattentektonischen Vorstellungen sind diese Blöcke vor ca. 320 Millionen Jahren kollidiert und haben sich ineinander verkeilt. In einem umfangreichen Meßprogramm sollten die physikalischen und chemischen Bedingungen innerhalb der kontinentalen Kruste erkundet werden. Neben dem Aufbau der Kruste versprach man sich wertvolle Informationen über ihre Entwicklung, die Ursachen der seismischen Reflektoren, der magnetischen und gravimetrischen Anomalien und der hohen elektrischen Leitfähigkeit, über den Fluidgehalt und dessen Einfluß auf die Lagerstättenbildung, die Wärmeproduktion und -leitung, den Gehalt an Radionukliden und das Alter der Gesteine u.v.m.

Bereits die Ergebnisse der Vorbohrung waren ebenso faszinierend wie ernüchternd: Von allen Vorhersagen haben sich nur die anzutreffenden Gesteinsarten bestätigt: Paragneise und Metabasite. Ungewöhnlich die Lagerung der Gesteine: Wie an einem Schaschlikspieß treten sie wiederholt auf. Die verfalteten Schichten winden sich schraubenförmig in die Tiefe, z.T. stehen sie senkrecht.

Im Verlauf der Vorbohrung wurde klar, daß die geplante Endtiefe von 14 km nicht zu erreichen sein wird, der Grund: die Temperatur nahm mit der Tiefe schneller zu als erwartet. Anstatt der geschätzten 90°C in 4000 m Tiefe waren es fast 120°C. Eine Extrapolation in die Tiefe ließ die Zieltemperatur von 300°C schon bei 10 km wahrscheinlich sein. Damit betrug die neue Zieltiefe jetzt 10 km – mit einer Option auf 12 km. Auch diese Absicht mußte während der Hauptbohrung noch einmal korrigiert werden, denn bereits bei 9.000 m war die kritische Temperaturgrenze fast erreicht. Zuletzt war das unter hohem Druck stehende Gestein bereits so plastisch, daß das Bohrloch nach jedem Wechsel der Bohrkrone inzwischen wieder verstopft war. Noch ist nicht geklärt, ob man tatsächlich in die Übergangszone vom spröden zum duktilen Verhalten der Materie eingedrungen ist oder ob Flüssigkeiten das Nachrücken des Gesteins erleichtern und diese Zone nur vortäuschen. Zur Zeit werden in dem Bohrloch weitere Experimente durchgeführt.

Die anfängliche Fehleinschätzung des Temperaturverlaufs hat ihre Ursache in den unzureichenden Informationen aus Flachbohrungen. Bis in 500 m Tiefe sorgt zirkulierendes Grundwasser für einen Temperaturausgleich, also einer Abführung der aus dem Erdinnern und vom radioaktiven Zerfall stammenden Wärme. Der in den Vorerkundungen ermittelte Temperaturgradient von nur 22°C/1000 m gab seinerzeit den Ausschlag für die Oberpfalz als Bohrlokalität und die projektierte Zieltiefe von 14 km. Ab einer Tiefe von 500 m stieg der Temperaturgradient aber rasch auf 29°C/1000 m an.

Schon in der Vorbohrung traf man mit zunehmender Tiefe auf ein ausgeprägtes System feiner Risse und Klüfte im Gestein. Das Gestein wird von meterdicken Zermürbungsbahnen durchzogen, in denen selbst die einzelnen Minerale zertrümmert oder zerrieben sind. In diesen Zonen finden sich auch bis zentimeterdicke Graphitadern, die als Ursache der hohen elektrischen Leitfähigkeit angesehen werden. Vermutlich stammt der Graphit aus der Reaktion von Kohlendioxid mit Methan. Der Fluidgehalt (gemeint sind Flüssigkeiten und Gase) nahm ab einer Tiefe von 3.200 m fast sprunghaft zu; aus 3.900 m Tiefe konnten während eines Pumpversuchs 75.000 Liter hochsalinarer Lauge aus dem Erdinneren gefördert werden. Der Kochsalz-Gehalt der Lauge entsprach etwa dem Doppelten der Konzentration in Meerwasser; überraschend blieb der Fluidgehalt auch bei zunehmender Tiefe während der Hauptbohrung hoch. Eine Besonderheit ist außerdem, daß seismische Befunde einen Wechsel der Gesteinsarten bei 3.200 m vermuten ließen. Anstelle eines anderen Gesteins fand man jedoch eine Zunahme des Flüssigkeitsgehalts – der indirekten Erkundung der Erdkruste mittels seismischer Messungen sind damit unerwartete Grenzen gesetzt. Neben der hohen Fluidkonzentration waren die hohen Anteile von Methan und Stickstoff in den unterirdischen Gasen nicht erwartet worden; auch hier steht die Erklärung aus.

Ein weiterer Fund in den Bohrkernen war rätselhaft: die Paragneise enthalten 400 Millionen Jahre alt datierte Mikroorganismen; die Gneise sind ehemalige Ablagerungsgesteine, die nach geologischer Datierung vor 380 Millionen Jahren metamorphisiert wurden, d. h. eine Umwandlung bei hohen Drücken und Temperaturen erfahren haben. Die Metamorphose muß bei Drücken erfolgt sein, die einer Tiefe von über 30 km entsprechen. Aber wie ist das Gestein in nur 20 Millionen Jahren in diese Tiefen gelangt? Überraschend ist auch, daß die Mikrofossilien überhaupt noch erhalten sind.

„Die Geologie-Lehrbücher müssen umgeschrieben werden"

Ausblick. Ob alle Beobachtungen in die derzeit anerkannten Modelle befriedigend eingegliedert werden können, muß bezweifelt werden. Vermutlich bedürfen unsere Vorstellungen von den geodynamischen Prozessen in der Erdkruste einer grundlegenden Überarbeitung. Das KTB hat ebenso wie die wenigen anderen Tiefbohrungen deutlich gemacht, daß unsere Kenntnisse vom geologischen Bau und den Vorgängen in der Tiefe noch recht dürftig sind – und dabei hat man im Grunde nur an der äußeren Schale der Erde gekratzt. Jedenfalls übertreffen die Ergebnisse einer Tiefbohrung

bei weitem den Beobachtungshorizont von mehreren Flachbohrungen. Gerade die Abweichungen von den erwarteten Befunden werden von den beteiligten Forschern außerordentlich positiv gewertet, denn eine großangelegte Bohrung, die lediglich alle indirekt gewonnenen Erkenntnisse bestätigt, wäre ausgesprochen langweilig. Welche Folgerungen sich aus den jüngsten Resultaten für das globale Bild von der Erde, ihrer geologischen Entwicklung und speziell von den Prozessen in der Erdkruste ergeben, wird die Aufarbeitung der neuen Daten in den nächsten Jahren zeigen. Vorläufiges Resümee von Peter KEHRER, eines am KTB beteiligten Wissenschaftlers: „Die Geologie-Lehrbücher müssen umgeschrieben werden" (KERR 1994).

Die Notwendigkeit eines internationalen Bohrprogramms haben letztes Jahr Forscher aus über 25 Ländern während eines Treffens im GeoForschungsZentrum in Potsdam (GFZ) hervorgehoben (ZOBACK & EMMERMANN 1994). Der wissenschaftliche und technische Erfolg des KTB hat die Geowissenschaftler stimuliert – nicht in den Weiten des Weltalls, sondern nur wenige Meter unter unseren Füßen harrt eine geheimnisvolle Welt ihrer Entdeckung.

Thomas Fritzsche

Literatur

Anonymus (1987) Start der KTB-Vorbohrung. Geowissenschaften in unserer Zeit *5*, 184.

EMMERMANN R (1986) Das deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm. Forschungskonzeption und Zielsetzungen. Geowissenschaften in unserer Zeit *4*, 19-33.

EMMERMANN R (1990) Vorstoß ins Erdinnere: das Kontinentale Tiefbohrprogramm. Spektrum der Wissenschaft, Okt., 60-70.

FRITZ P & LODEMANN M (1990) Die salinaren Tiefenwässer der KTB-Vorbohrung. Die Geowissenschaften *8*, 273-278.

KERR RA (1994) German super-deep hole hits bottom. Science *266*, 545.

ZOBACK MD & EMMERMANN R (1994) Toward establishing an international continental scientific drilling program. EOS *75* (40), 461.

War Australopithecus robustus ein Werkzeughersteller?

Menschen sind nicht die einzigen Lebewesen, die Werkzeuge verwenden. Schimpansen stellen sogar gelegentlich einfache Werkzeuge aus Rohmaterialien selbst her (BECKER 1993). Doch während der Werkzeuggebrauch bei Schimpansen nicht unbedingt erforderlich zu sein scheint, ist er für den heutigen Menschen lebensnotwendig. Das erste Auftreten von Werkzeugen wird deshalb als ein entscheidender Schritt in der Evolution zum Menschen angesehen.

Die frühesten bekannten Steinwerkzeuge sind in geologischen Schichten geborgen worden, die auf ca. 2,5 Millionen Jahre datiert werden (Abb. 1). Im allgemeinen werden diese Werkzeuge *Homo habilis,* dem frühesten und bis heute umstrittenen Vertreter der Gattung *Homo* zugeschrieben. Jüngst vertrat SUSMAN (1994) die These, daß unter den frühen Hominiden auch *Australopithecus robustus* zu den Benutzern und Herstellern dieser Werkzeuge gehörte. Diese Behauptung ist erstaunlich zu einem Zeitpunkt, da sich die Indizien dafür verdichten, daß seine grazilen Verwandten (von denen reichhaltigeres Fundmaterial vorliegt als von den robusten Australopithecinen) dem Menschen in vielen Merkmalen unähnlicher sind als zunächst angenommen.

Was sind nun aber die Daten, auf die sich SUSMAN stützt?

Die menschliche Hand besitzt spezielle Anpassungen für die Herstellung und Benutzung von Werkzeugen. Eines der wichtigsten Merkmale ist dabei die stark entwickelte Daumenmuskulatur. Der Mensch kann wie viele andere Primaten den

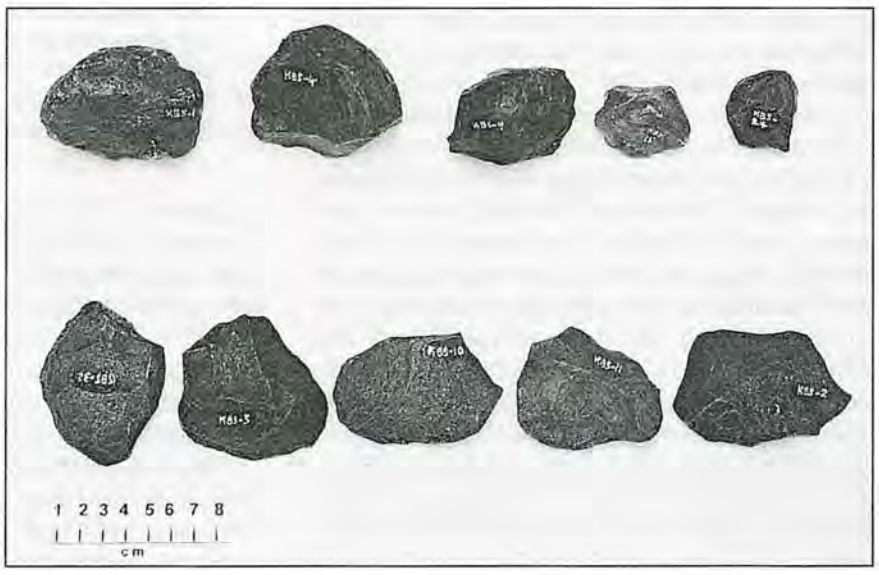


Abb. 1: Abgüsse von ältesten Steinwerkzeugen aus Koobi Fora (Kenia). Oben: Haumesser (Choppers). Unten: Splitter (Flakes)

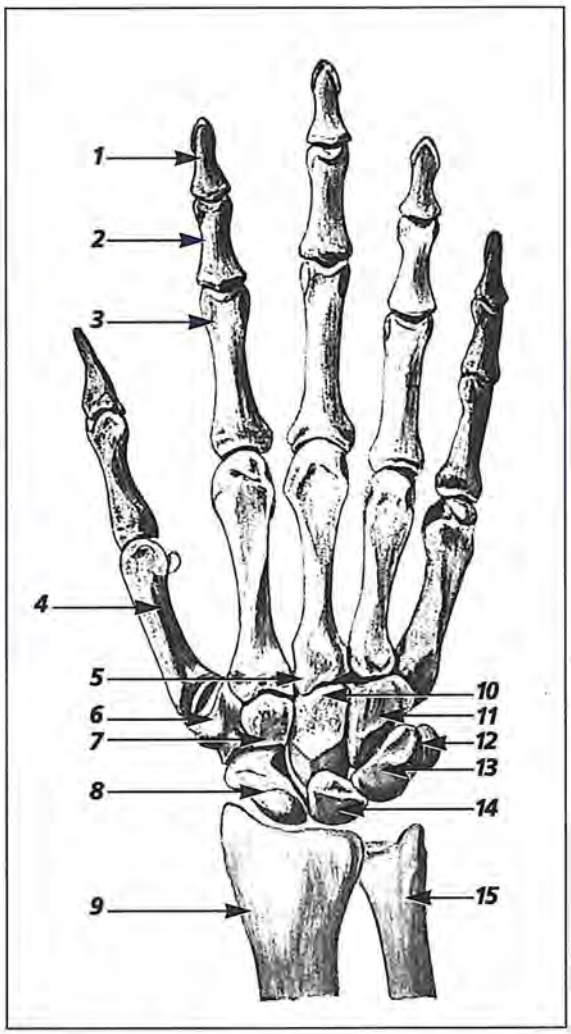


Abb. 2: Die Hand des Menschen (Rückseite). Abkürzungen: (1) Fingerendglied, (2) Fingermittelglied, (3) Fingergrundglied, (4) Daumenmittelhandknochen, (5) Griffelfortsatz des Mittelhandknochen III, (6) großes Vieleckbein, (7) kleines Vieleckbein, (8) Kahnbein, (9) Speiche, (10) Kopfbein, (11) Hakenbein, (12) Erbsenbein, (13) Dreiecksbein, (14) Mondbein, (15) Elle

Daumen den restlichen vier Fingern gegenüberstellen. Einmalig ist aber die Fähigkeit der menschlichen Hand, eine bedeutende Kraft auf gehaltene Gegenstände auszuüben, wie es beispielsweise beim Greifen eines Hammers erforderlich ist. Die Möglichkeit der Ausübung einer großen Kraft durch den menschlichen Daumen hängt mit den gut entwickelten Daumenmuskeln zusammen. Zu ihnen gehören auch drei Muskeln (Musculus flexor pollicis longus, tiefer Kopf des Musculus flexor pollicis brevis und der erste palmare interossäre Muskel), die bei den afrikanischen Großaffen fehlen.

SUSMAN hat nachgewiesen, daß der Daumenmittelhandknochen des Menschen (Abb. 2) einen breiten Kopf in Relation zur Länge besitzt. Dagegen ist das vordere Ende dieses Knochens beim Schimpansen schmal. Aus der Morphologie des ersten Mittelhandknochens kann auf den Ausbildungsgrad der Daumenmuskulatur und nach SUSMAN damit auch auf die Fähigkeit der Hand zur Herstellung von Werkzeugen und zum Umgang mit ihnen geschlossen werden. Erwartungsgemäß besitzt *Australopithecus afarensis* (AL 333w-39) ein den Pongiden ähnelndes Metacarpale I, und damit fehlt der Hand die Fähigkeit zum habituellen Umgang mit Werkzeugen. Dagegen ist für die meisten Paläanthropologen die sich aus der Morphologie des Daumen-

Tabelle 1

Wichtige Merkmale der menschlichen Hand, die eine effektive Benutzung und Herstellung von Steinwerkzeugen ermöglichen.

1. Langer Daumen im Verhältnis zur Handlänge
→ Der Ballen des Daumenendgliedes ist so in der Lage, den Druck aller Finger auszubalancieren, wenn diese zusammen ein Objekt halten und rotieren.
2. Breiter Daumenmittelhandknochen
→ weist auf gut entwickelte Daumenmuskeln hin.
3. Stabilität im Hohlhandzentrum
In der Region des zweiten und dritten Mittelhandknochens gibt es eine Reihe von Merkmalen, die die Hohlhand gegen äußere und innere Kräfte stabilisieren, welche bei der Werkzeugherstellung und -benutzung wirken. Zu diesen Merkmalen gehören:
→ robustes Kopfbein, dem eine deutliche Einkerbung auf der Außenseite für das Zwischenknochenband mit dem kleinen Vieleckbein fehlt. Auf der Hohlhandseite befindet sich ein zwiebelförmiges Areal, welches die Gelenkflächen für die Mittelhandknochen II und III knöchern unterstützt.
→ robuster Mittelhandknochen II und kräftige Basen von Mittelhandknochen II und III
→ Stabilisierung der Basis des Mittelhandknochens III durch einen Griffelfortsatz an der Basis von Mittelhandknochen III, der gegen das Kopfbein grenzt; Erbsenbeinmittelhandknochenband (überbrückt eine Grube zwischen dem Hakenbeinhäkchen und den Handwurzelmittelhandgelenken VI und V und setzt an der Basis der Mittelhand an)
4. Drehung der Finger
→ Asymmetrie der Mittelhandknochen durch Ausrichtung von Mittelhandknochen II und III zum Daumenmittelhandknochen
→ Einwärtsdrehfähigkeit des zweiten Fingers durch entsprechend ausgerichtete Gelenkflächen zwischen Mittelhandknochen II, Vieleckbein (mehr in der Frontalebene) und Kopfbein (distal)
→ Die Gelenkfläche zwischen dem Hakenbein und dem Mittelhandknochen V zeigt eine Sattelform und ermöglicht so eine Gegenüberstellung von Kleinfingerballen- und Daumenballengebiet.
5. Sicherer Griff der Fingerendglieder
→ durch breite Fingerendglieder

metacarpale SKX 5020 *(Australopithecus robustus* zugeordnet) aus Swartkrans ergebende funktionelle Schlußfolgerung von SUSMAN eine große Überraschung: Mit einem breiten Kopf in Relation zur Länge soll diese *Australopithecus*-Spezies trotz ihres wesentlich kleineren Gehirns über die gleichen Fähigkeiten des Umganges mit Werkzeugen wie die frühesten *Homo*-Vertreter verfügen.

AIELLO (1994) nimmt dazu in der Ausgabe von *Science*, in der SUSMAN seine Ergebnisse veröffentlicht hat, kritisch Stellung. Zum einen ist die taxonomische Zuordnung von SKX 5020 zu *Austra-*

Glossar

A.L: Abkürzung für Afar Locality

habituell: gewohnheitsmäßig.

Morphologie: Lehre vom Bau und von der Gestalt (Morphe) der Lebewesen und ihrer Organe

Olduwan: Geröllgerätekultur, benannt nach der Olduvaischlucht (Tansania)

Pongiden: Gruppe der Großaffen Orang-Utan, Gorilla, Schimpanse und Zwergschimpanse

Prozessus styloideus: Griffelfortsatz; hier: an der hinteren Basis des dritten Mittelhandknochens, s. Abb. 2

SK: Abkürzung für Swartkrans

lopithecus robustus nicht unumstritten. SKX 5020 kommt aus dem gleichen geologischen Horizont in Südafrika, aus dem auch das zum Vergleich herangezogene Metacarpale I SK 84, welches *Homo erectus* zugeordnet werden kann, stammt. SKX 5020 ist von SK 84 morphologisch nicht sicher zu unterscheiden, und der Größenunterschied zwischen beiden Knochen schließt nicht aus, daß sie zur gleichen Spezies gehören (Trinkaus & Long 1990).

> Die Datenbasis ist oft nicht ausreichend für die gezogenen Schlußfolgerungen.

Damit zeigt sich hier ein Problem, das häufig in der Paläanthropologie anzutreffen ist: Die Datenbasis ist nicht ausreichend für die gezogenen Schlußfolgerungen. Zwei nicht eindeutig zuordenbare Knochen genügen nicht, um zu bestimmen, ob mehr als eine frühhominide Spezies aus dem gleichen Zeithorizont Werkzeuge herstellte und benutzte.

Zweitens gibt es keinen zwingenden Zusammenhang zwischen dem einzelnen Handmerkmal „kräftiger Daumen" und der Werkzeugherstellung. Für die Herstellung von Steinwerkzeugen sind neben einem kräftigen Daumen noch andere Handmerkmale erforderlich, die einen festen Griff und eine effiziente Haltung des Werkzeugs in der Hand ermöglichen (Marzke 1983, Marzke & Shackley 1986; Tab.1). Zu diesen Merkmalen gehören ein im Vergleich zu den anderen Fingern relativ langer Daumen sowie die Fähigkeit der Spreizung und Gegenüberstellung von Daumen und Fingern, z.B. beim Greifen eines kleinen Balles oder Benutzen eines Hammersteines. Dieser Grifftyp erfordert eine Hohlhand. Sie unterstützt die Position des Daumens und der Finger beim Halten eines runden Objektes. Der Daumen von *Australopithecus afarensis* ist nicht kräftig, aber relativ lang im Vergleich zu den heute lebenden Pongiden. Außerdem besitzt *Australopithecus afarensis* notwendige Modifikationen im Zeige- und Mittelfingerbereich der Hand, die eine teilweise Hohlhand ermöglichen. *Australopithecus afarensis* konnte zwar keinen Hammerstein mit allen fünf Fingern wie der moderne Mensch greifen, aber ein Halten zwischen dem Daumen, Zeige- und Mittelfinger war bei dieser frühen Hominidenspezies möglich. *Australopithecus afarensis* besaß daher bessere anatomische Voraussetzungen für die Nutzung von Werkzeugen als die rezenten Pongiden. Der Beurteilung der *Australopithecus afarensis*-Hand durch Aiello muß noch hinzugefügt werden, daß diese Hand wegen eines fehlenden Prozessus styloideus an der Basis des dritten Mittelhandknochens (Abb. 2) den dauerhaften Belastungen, die bei der Benutzung von Steinwerkzeugen am Knochen auftritt, nicht gewachsen war (Marzke & Marzke 1987). Aiello warnt abschließend davor, allein von einem kräftigen Daumen auf einen großen Sprung in den intellektuellen und sprachlichen Fähigkeiten oder sinnbildlichen Ausdrucksmöglichkeiten (was eine habituelle Steinwerkzeugherstellung implizieren würde) bei unseren Vorfahren zu schließen.

Es bleibt zu vermerken, daß eine habituelle Fähigkeit von *Australopithecus robustus* zur Herstellung von Steinwerkzeugen die Schöpfungslehre vor Probleme stellen würde. Die meisten Paläanthropologen deuten heute *Australopithecus robustus* als einen Seitenzweig in der Evolution zum Menschen. Im Schöpfungsmodell stellt *Australopithecus robustus* zusammen mit den anderen Australopithecinen einen eigenständigen ausgestorbenen Großaffen-Grundtyp dar. Obwohl die Hand der Großaffen nicht über die spezifischen Anpassungen für eine gewohnheitsmäßige Herstellung von Steinwerkzeugen verfügt, konnten Forscher dem Zwergschimpansen „Kanzi" das Abschlagen von Splittern von einem Feuersteinkern mit einem Hammerstein lehren. Gleichzeitig zeigte sich aber auch, daß die frühesten Werkzeughersteller (Olduwan) über ein wesentlich besseres Verständnis der Prinzipien und der Mechanik der Steinwerkzeugherstellung verfügten als die heutigen Großaffen (Schick & Toth 1993). Bei unserem derzeitigen Kenntnisstand ist also die massenweise Herstellung und Benutzung auch der ältesten uns bekannten relativ einfachen Steinwerkzeuge durch *Australopithecus robustus* als einem nichtmenschlichen Primaten nicht zu erwarten.

Michael Brandt

Literatur

Aiello LC (1994) Thumbs up for our early ancestors. Science *265*, 1540-1541.

Becker P-R (1993) Werkzeuggebrauch im Tierreich. Stuttgart.

MARZKE MW (1983) Joint functions and grips of the *Australopithecus afarensis* hand, with special reference to the region of the capitate. J. Hum. Evol. *12*, 197-211.

MARZKE MW & MARZKE RF (1987) The third metacarpal styloid process in humans: Origin and functions. Am. J. Phys. Anthrop. *73*, 415-431.

MARZKE MW & SHACKLEY MS (1986) Hominid hand use in the Pliocene and Pleistocene: Evidence from experimental archaeology and comparative morphology. J. Hum. Evol. *15*, 439-460.

SCHICK KD & TOTH N (1993) Making silent stones speak. New York.

SUSMAN RL (1994) Fossil evidence for early hominid tool use. Science *265*, 1570-1573.

TRINKAUS E & LONG JC (1990) Species attribution of the Swartkrans Member 1 first metacarpals: SK 84 and SKX 5020. Am. J. Phys. Anthrop. *83*, 419-424.

Schnelle Artbildung bei einem marinen Vielborster (Polychaeta)

Was ist eine Art? Unter den Biologen besteht kein Konsens über eine Artdefinition; dies gilt auch für höhere taxonomische Kategorien wie Gattung, Familie oder höhere Hierarchien. Die Kategorie des Grundtyps ist dagegen durch das Kriterium der Kreuzbarkeit schärfer faßbar (SCHERER 1993a); Grundtypen umfassen in der Regel mehrere Gattungen, manchmal liegt der Grundtyp auf der Ebene der Tribus, Unterfamilie oder Familie (SCHERER 1993b). Es ist jedoch unumstritten, daß auch bei Anwendung unterschiedlicher Artdefinitionen die Bildung von Arten (Speziation) demonstriert werden kann (JUNKER 1993). Zwar werden für Artbildung gewöhnlich sehr lange Zeiten veranschlagt, doch häufen sich die Hinweise, daß Biospezies auch in sehr kurzen Zeiträumen entstehen können, wie das folgende Beispiel eindrücklich zeigt.

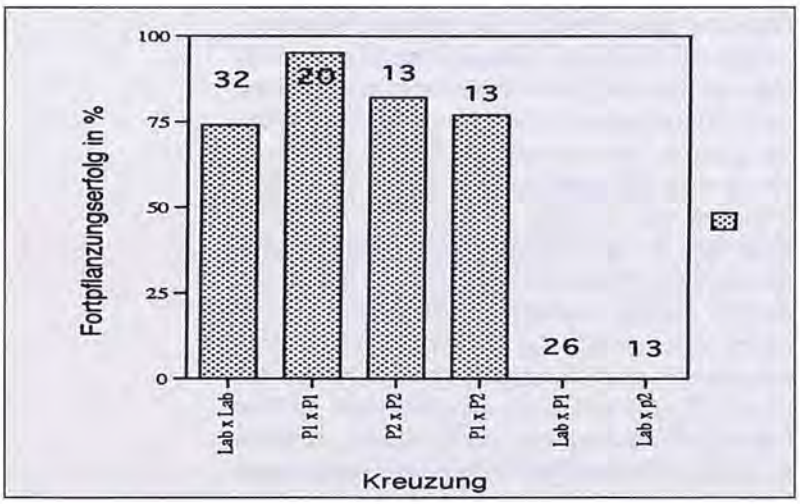


Abb. 1: Ergebnisse von Kreuzungen zwischen verschiedenen Nereis acuminata *Populationen. Lab: Laborpopulation; P1: Freilandpopulation 1; P2: Freilandpopulation 2. Die Ziffern über den Balken geben die Anzahl der untersuchten Paarungen an. Ein Individuum war jeweils nur einmal an einem Experiment beteiligt, insofern sind die Ergebnisse unabhängig voneinander. Als Fortpflanzungserfolg wurde gewertet, wenn die Jungtiere die Wohnröhre des Vaters verlassen hatten, um eigene Wohnröhren zu graben. In keinem einzigen Fall glückte die Verpaarung eines Labortieres mit einem Tier aus der Freilandpopulation, obwohl die jeweils nachfolgenden Kontrollexperimente zeigten, daß sich genau diese Tiere mit einem Partner aus der eigenen Population fortpflanzen konnten. (Nach WEINBERG et al. 1992)*

Die Polychaeten sind eine Klasse des Tierstammes der Annelida (segmentierte Würmer, Tab. 1), dessen bekanntester Vertreter der Regenwurm ist (Oligochaeta, *Lumbricus terrestris*). Jedes Körpersegment der Polychaeten trägt ein Paar paddelförmige, der Fortbewegung dienende Scheinfüßchen (Parapodien), an deren Ende zahlreiche Borsten sitzen (daher der deutsche Name Vielborster). Polychaeten können freischwimmend existieren, bauen sich eigene Wohnröhren in Korallenriffen oder wohnen in selbstgegrabenen Röhrenbauten im marinen Sediment. Häufig stellen sie die zahlenmäßig dominante Tierform in marinen benthischen Lebensräumen (Sediment auf dem Meeresboden). Polychaeten gehören zu den farbenprächtigsten Organismen der Meere und sind jedem Besucher von größeren Aquarien in Zoologischen Gärten bekannt. Besonders fallen die mächtigen, ästhetisch ansprechenden Tentakelkronen von Röhrenwürmern in Korallenriffnachbildungen auf, mit denen die Tiere Nahrungspartikel herbeistrudeln.

Bei der hier interessierenden, von WEINBERG et al. (1992) untersuchten Art handelt es sich mit *Nereis acuminata* um einen eher unauffälligen, nahezu kosmopolitisch in Küstensedimenten verbreiteten Vertreter. *N. acuminata* ist trotzdem ungewöhnlich: Bei der monogamen Paarung deponiert das Weibchen ihre reifen Eier in der Wohnröhre des Männchens, verläßt diese und stirbt kurz danach. Die deponierten Eier werden befruchtet und die jungen Tiere wachsen unter der Obhut und Fürsorge des Männchens drei bis vier Wochen lang heran, bevor sie herauskriechen, um ihre eigenen Wohnröhren zu graben. Im Labor kann man 3-5 Generationen pro

Stud. Int. J. 2 (1995), 42 – 43

Jahr züchten.

Diese Art wird gerne als Bioindikator für die Wirkung umweltverschmutzender Substanzen benutzt. Daher ist die Geschichte der untersuchten Laborpopulation sehr gut bekannt: Im Juli 1964 begann D. J. REISH eine Laborkultur mit 5 oder 6 Individuen von Long Beach Harbor, Kalifornien. Diese Gründerpopulation vermehrte sich auf mehrere tausend Individuen. Am 5. Dezember 1986 wurden aus dieser Laborpopulation 4 Paare in das Ozeanische Institut Woods Hole gebracht. Sie vermehrten sich dort bis 1988 zu einer Population von mehreren tausend Individuen. Damit sind bei diesen Tieren zwei extreme Gründerereignisse dokumentiert. Ein Gründerereignis wird auch als „bottle neck" bezeichnet; eine Ausgangspopulation wird durch einen Populationsengpaß geführt, indem durch einen Umwelteinfluß (katastrophische Dezimierung, Migration oder anderweitig verursachte geographische Isolation) nur wenige Individuen eine Fortpflanzungsgemeinschaft mit hohem Inzuchtpotential bilden.

WEINBERG et al. versuchten, zwischen Dezember 1986 und März 1991 aus dem ursprünglichen Gebiet Individuen der Wildpopulation zu sammeln. Zwar waren an der ursprünglichen Lokation keine Vielborster dieser Art mehr zu finden, doch 11 bzw. 37 km davon entfernt wohnte *Nereis acuminata*. Ausgedehnte Kreuzungsexperimente zwischen der Laborpopulation und den beiden Freilandpopulationen sollten zeigen, ob sich durch die beiden Gründerereignisse im Labor eine neue Art entwickelt hat. Das Ergebnis war eindeutig: Zwischen der Laborpopulation und den beiden Freilandpopulationen war eine vollständige Fortpflanzungsisolation eingetreten (Abb. 1). Nach einer mehr oder weniger weit fortgeschrittenen Embryonalentwicklung starben alle Jungtiere spätestens nach 10 Tagen. Chromosomenanalysen ergaben, daß nur Chromosom Nr. 9 (2n=18) zwischen der Laborpopulation und den Freilandpopulationen unterschiedlich war. Andere Populationen der gleichen Art aus Hawaii bzw dem Atlantik zeigen dagegen teilweise völlig unterschiedliche Chromosomenzahlen und Chromosomenformen (2n=22 bis 2n=28).

Verschiedene, von den Autoren eingehend diskutierte Gründe sprechen dafür, daß hier tatsächlich innerhalb weniger Jahre ein Artbildungsereignis stattgefunden hat, wenn man die scheinbar vollständige reproduktive Isolation zwischen zwei Populationen als definitiv artentrennendes Kriterium akzeptiert. Weitere Beispiele für eine sehr schnelle Ausbildung von reproduktiver Isolation finden sich auch bei Insekten (DODD 1989) oder bei Pflanzen (JUNKER 1993).

Siegfried Scherer

Tabelle 1

Mögliche Untergliederung des Tierstammes der Annelida mit typischen Merkmalen und Vertretern. Insgesamt umfaßt der Stamm ca. 10.000 beschriebene Arten. Die systematische Stellung der einzelnen Gruppen zueinander ist unklar.

Polychaeta (Vielborster)	„Sandwürmer, Röhrenwürmer", hauptsächlich marin, getrennte Geschlechter, jedes Körpersegment trägt zwei Scheinfüßchen mit zahlreichen Borsten; gut entwickelter Kopf mit Augen, Antennen, oft Tentakeln oder anderen Werkzeugen
Oligochaeta (Wenigborster)	„Regenwürmer", terrestrisch oder im Süßwasser, nur wenige Borsten pro Körpersegment, schlecht entwickelter Kopf, keine Scheinfüßchen, Zwitter. Bekannter Vertreter: Regenwurm (*Lumbricus terrestris*)
Hirudinea (Egel)	mit vorderem und hinterem Saugnapf; Parasiten, Räuber. Blutsauger, terrestrisch und limnisch. Bekannter Vertreter: Medizinischer Blutegel (*Hirudo medicinalis*)

Literatur

DODD DM (1989) Reproductive isolation as a consequence of adaptive divergence in Drosophila pseudoobscura. Evolution *43*, 1308-1311.

JUNKER R (1993) Prozesse der Artbildung. In SCHERER S (ed) Typen des Lebens. Berlin: Pascal, pp. 31-45.

SCHERER S (1993a) Basic types of life. In SCHERER S (ed) Typen des Lebens. Berlin: Pascal, pp. 11-30.

SCHERER S (ed) (1993b) Typen des Lebens. Berlin: Pascal.

WEINBERG JR, STARCZAK VR & JÖRG D (1992) Evidence for rapid speciation following a founder event in the laboratory. Evolution *46*, 1214-1220.

Neues zu alter DNA

Die Resultate von Untersuchungen von aus Fossilien isolierten DNA-Bruchstücken werden kontrovers diskutiert (BINDER 1994). Einerseits verspricht man sich von Sequenzdaten alter, schon ausgestorbener Organismen Einsichten in verwandtschaftliche Beziehungen. Gleichzeitig wird die Stabilität von Makromolekülen, wie die DNA, über große Zeiträume bestritten. In kritischen Publikationen wurden unter anderen folgende Forderungen aufgestellt, um die Resultate abzusichern: es sollten möglichst verschiedene Individuen einer Art untersucht werden, negative Resultate mit den positiven veröffentlicht werden und zur Bestätigung der Methoden sollten Proben von moderatem Alter untersucht werden (LINDAHL 1993 a,b).

In zwei Kurzmitteilungen wurden nun Resultate vorgelegt, welche diese Forderungen berücksichtigen (HÖSS et al. 1994; HAGELBERG et al. 1994). In beiden Arbeiten wurden Mammuts untersucht. Höss et al. extrahierten DNA aus Weichteilen von sibirischen Mammuts aus dem Pleistozän, welchen ein Alter zwischen 9.700 und mehr als 50.000 Jahre zugeordnet wird. Von 5 Mammuts wurden insgesamt 15 Nukleinsäure-Proben extrahiert (Mehrfachproben bei einzelnen Individuen). Durch enzymatische Vervielfältigung eines Fragments mit 93 Basenpaaren aus mitochondrialer 16S rRNA gelang die Vermehrung von 7 Proben aus 4 Individuen. Verschiedene Proben eines Individuums ergaben identische Sequenzen. Die Mammuts unterscheiden sich untereinander durch 0-5 Substitutionen und im Vergleich mit einem afrikanischen und einem indischen Elefanten (welche im Vergleich miteinander 2 Substitutionen aufweisen) durch 0-4 Substitutionen. Auch Vergleiche mit anderen Huftieren (Kuh und Pferd) wurden angestellt. In einer zweiten Arbeit (HAGELBERG et al. 1994) wurde DNA aus den Knochen von zwei Wollhaarmammuts (zugeordnetes Alter: 47.000 Jahre) untersucht. Erfolgreich konnte mit PCR-Technik ein Abschnitt des mitochondrialen Cytochrom b Gens (Basen 96-378) vermehrt und sequenziert werden. Die Sequenzen wurden zu phylogenetischen Betrachtungen mit denen von 6 asiatischen und 9 afrikanischen Elefanten verglichen. Vorläufige Untersuchungen zur Phylogenie dieser Individuen auf der Basis der Sequenzdaten zeigen, daß die Mammuts in die Gruppe der Elefantenartigen fallen. Ähnliche Analysen mittels Radioimmunoessay hatten bereits früher zum selben Resultat geführt. Die bisher zur Verfügung stehenden Daten reichen nach Aussage der Autoren noch nicht für eine befriedigende Auflösung der evolutionären Verwandtschaftsbeziehungen innerhalb der Gruppe der Elefantenartigen aus.

Mit diesen Untersuchungen konnte die Bedeutung der PCR-Technik für die molekulare Archäologie erneut demonstriert und die Überzeugungskraft ihrer Aussagen gestärkt werden. Es wäre zu wünschen, daß auch die Untersuchungen an älteren Organismen aus Bernstein nach ähnlichen Kriterien durchgeführt werden. Eine Entscheidung, ob die untersuchte 'alte' DNA wirklich das ihr zugesprochene Alter aufweist, kann aufgrund solcher Untersuchungen jedoch nicht getroffen werden.

Harald Binder

Literatur

BINDER H (1994) Kontroverse Diskussion um alte DNA. Stud. Int. J. *1*, 33.

LINDAHL T (1993a) Instability and decay of the primary structure of DNA. Nature *362*, 709-715.

LINDAHL T (1993b) Recovery of antediluvian DNA. Nature *365*, 700.

HÖSS H, PÄÄBO S & VERESHCHAGIN NK (1994) Mammoth DNA sequences. Nature *370*, 333.

HAGELBERG E, THOMAS MG, COOK CE jr., SHER AV, BARYSHNI-

STREIFLICHTER

Die Bedeutung von Leitgefäßen für den Sprung ans Land

Der Übergang vom Wasser ans Land gilt als sehr schwieriger Schritt im evolutionären Szenario – bei Tieren wie bei Pflanzen. Computersimulationen haben gezeigt, daß Wasserleitgefäße bereits bei nur wenige Millimeter großen Landpflanzen mit schlanken Achsen verwirklicht gewesen sein mußten, damit die Wasserversorgung des Pflanzenkörpers auf dem Land sichergestellt werden konnte. Parenchymatisches (unspezialisiertes) Gewebe ermöglicht nur einen sehr begrenzten Wassertransport. Dies entspricht der Tatsache, daß der Abstand zwischen Leitgefäßen in Blättern allgemein weniger als 1 mm beträgt. Die Modellrechnungen machen das frühe Auftreten von Wasserleitsystemen in Landpflanzen verständlich, da mit Beginn der Existenz von Landpflanzen ein mehr oder weniger spezialisiertes Leitgewebe offenbar bereits ausgebildet gewesen sein muß. In Wasserbiotopen besteht dafür keine Notwendigkeit, und Leitgefäße sind bei Algen unbekannt. Die Problematik einer evolutiven Entstehung von Gefäßpflanzen aus Wasseralgen oder Bodenalgen (hierzu gibt es konkurrierende Theorien) wird dadurch verschärft. [ROTH A, MOSBRUGGER V & NEUGEBAUER HJ (1994) *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 345*, 137-152] *RJ*

Molekulare und klassische Taxonomie bei Pflanzen

Mitochondriales Erbmaterial erweist eine engere Verwandtschaft der Bärlappgewächse zu den Moosen als zu den Farnen und Schachtelhalmen. Darauf weisen Sequenzdaten der Untereinheit III der Cytochrom-c-Oxidase-Sequenzen (coxIII) hin. Dazu kommt der gemeinsame Besitz eines bestimmten homologen Introns durch Moose und Bärlappe, das

bei anderen Pflanzengruppen nicht bekannt ist. Nach morphologischen Merkmalen werden die Bärlappgewächse jedoch traditionell zusammen mit den Farnartigen den Moosen gegenübergestellt – ein Merkmalswiderspruch. Schachtelhalme und Gabelblattpflanzen (Psilotales) zeigen Ähnlichkeiten mit den Farnen und Blütenpflanzen und sind nach den zugrundegelegten Daten an der Verzweigung dieser beiden großen Gruppen anzusiedeln. Diese Untersuchungen zeigen, daß die erst am Anfang stehende Einbeziehung molekularer Merkmale in die Taxonomie und Phylogenetik zu neuen Einsichten führen kann, was jedoch – unter Berücksichtigung aller vorliegenden Daten – nicht unbedingt zu größerer Klarheit über die verwandtschaftlichen Beziehungen führt. [HIESEL R, VON HAESELER A & BRENNICKE A (1994) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA 91,* 634-638] *RJ*

Artbildung ohne geographische Trennung

Laborexperimente zu Mechanismen der Artbildung (Grundtypaufspaltung) liefern Bestätigungen für die Möglichkeit der umstrittenen sympatrischen Artbildung (d. h. Artbildung ohne geographische Trennung der Ausgangspopulation) – das jedenfalls zeigen W. R. RICE und E. E. HOSTERT in einer Dokumentation von Experimenten in den letzten 40 Jahren. Präzygotische Isolation (Verhinderung von Mischlingen durch Vermeidung von Begattung bzw. Bestäubung) tritt offenbar als Nebenprodukt vielfältiger unterschiedlicher Selektionswirkungen auf und kann, nach den Experimenten zu schließen, gleichermaßen in Allopatrie (Trennung von Teilpopulationen) und in Sympatrie erfolgen. Die genetische Isolation wird vermutlich im „Huckepackverfahren" (hitchhiking) aufgrund genetischer Koppelung mit den selektierten Genen erworben. Die in den letzten Jahren verstärkt diskutierte Möglichkeit der Artbildung nach einem Flaschenhalsereignis fand dagegen durch die Laborexperimente kaum Bestätigung. [RICE WE & HOSTERT EE (1993) *Evolution 47(6),* 1637-1653; BUSH GL (1994) *Tr. Ecol. Evol. 9,* 285-288.] *RJ*

Erneuter Hinweis auf frühen Ursprung der Blütenpflanzen?

Oleanane und verwandte Öle in Gesteinen gelten als Hinweise auf die Existenz von Blütenpflanzen (Angiospermen). Im Großen und Ganzen passen Oleanan-Analysen von Proben aus der Kreide und dem Tertiär zur Fossilüberlieferung der Angiospermen. Allgemein akzeptierte Angiospermenfunde liegen ab der Unterkreide vor, doch wurden auch unsichere Funde in tieferen Schichten gemacht (vgl. *Stud. Int. J. 1,* S. 39). Dem entspricht das seltene Vorkommen von Oleananen bereits im Mitteljura Westsibiriens und sogar aus dem Oberkarbon. Die Deutung ist vorerst unklar: Hat eine alte Angiospermenlinie einen chemischen Marker hinterlassen, lange bevor unzweifelhafte Pflanzenreste von Blütenpflanzen überliefert wurden, stammt das Oleanan von der Angiospermen-Schwesterngruppe oder sind auch andere Pflanzen in der Lage, Oleanan-Vorstufen zu produzieren? [MOLDOVAN et al. (1994), *Science 265,* 768-771] *RJ*

Navigation am Himmel

Daß sich Insekten an bestimmten Landmarken orientieren, die sie sich bei früheren Ausflügen eingeprägt haben, ist seit längerem bekannt. Was aber geschieht, wenn ein solcher Orientierungspunkt keine eindeutigen Hinweise auf die anzufliegende Richtung zuläßt? Für die kleinen Flieger scheint dies kein ernsthaftes Problem zu sein. Offensichtlich enthält ihr Navigationssystem bisher unbekannte Elemente, die sie auch diese Schwierigkeiten meistern lassen.
Um das Geheimnis zu lüften, experimentierte J. A. DICKINSON von der Michigan State University (USA) mit Honigbienen. Versuchsstrecke war eine runde Arena mit 1,20 Metern Durchmesser. Im Zentrum befand sich eine zylinderförmige „Landmarke", im gleichmäßigen Abstand von ihr vier Behälter. Einer war zunächst mit Nährstofflösung gefüllt, die anderen mit Wasser. Zunächst hatten die Bienen Gelegenheit zu trainieren, d.h., sich den Standort des „richtigen" Behälters einzuprägen. Dann – bei ihrem fünften Besuch – war auch der vierte Behälter nur mit Wasser gefüllt. Die Bienen steuerten ihn dennoch immer wieder gezielt an. Ernsthafte Orientierungsprobleme bekamen sie erst, als der Himmel über ihnen bewölkt war, für DICKINSON ein deutlicher Hinweis darauf, daß die Bienen die Flugrichtung nach dem Himmel, etwa dem Stand der Sonne koordinieren. Hinweise anderer Autoren auf einen inneren Kompaß der Tierchen konnte der Forscher nicht bestätigen, mochte sie aber auch nicht ausschließen, zumal er mehrfach redundante Orientierungssysteme unter anderen Umständen für sehr wahrscheinlich hält. [DICKINSON JA (1994) *Naturwissenschaften 81,* 465-67] *UZ*

Katastrophen und ihre Auswirkungen

Das Ausmaß großer Sterbeereignisse in der Erdvergangenheit wird nicht allein durch die Katastrophen selbst bestimmt. Ebenso wichtig sind die Wiederausbreitung und Neuorganisation der Lebensgemeinschaften in den Folgezeiten. Dies ist das Fazit eines Treffens des „International Geologic Correlation Project 335" Anfang September 1994 im englischen Plymouth.

Manche Familien oder Gattungen, die eine solche Großkatastrophe augenscheinlich besonders unbeschadet überstanden haben, verschwinden wenig später völlig von der Bildfläche. Andere – der amerikanische Paläontologe David JABLONSKI bezeichnet sie als „Lazarus-Taxa" – scheinen bereits ausgestorben zu sein, bevor sie über lange Zeiträume sehr erfolgreich wieder auftreten.

Die Ursachen sind in den meisten Fällen noch unklar. Die Paläontologen erhoffen sich aber von der systematischen Untersuchung der nachkatastrophalen Fossilfunde und dem Einsatz geochemischer und radiometrischer Methoden Antworten.

Klar ist indes, was vor wenigen Jahren noch kaum beachtet wurde: Katastrophale Aussterbeereignisse und ihre Spätfolgen sind wesentliche Faktoren der postulierten Evolution. Die Idee des unterbrochenen Gleichgewichts (Punktualismus), wonach kurzen, heftigen Evolutionsschüben lange Zeiten ohne nennenswerte Veränderungen folgen, ist nicht neu. Die in Plymouth diskutierten Beobachtungen könnten aber einen neuen Rahmen dafür liefern. So schlägt Peter SHEEHAM vom Milwaukee Public Museum vor, die letzten 460 Millionen Jahre der Erdgeschichte in sechs „ökologische Evolutionseinheiten" (EEU – Ecological Evolutionary Units) mit einer Dauer zwischen 35 und 142 Millionen Jahren einzuteilen. Jede EEU wurde danach durch eine Katastrophe beendet, die nachfolgende begann nach einer Übergangszeit zwischen 3 und 8 Millionen Jahren.

Das Neuartige an dieser Einteilung ist, daß sie nicht, wie die bisherigen, auf dem Auftreten und Verschwinden bestimmter Fossilarten, sondern auf ökologischen Mustern aufbaut. Entscheidend ist die Identifizierung von Tiergruppen, die die Schlüsselnischen der vergangenen Ökosysteme besetzt hatten. [KERR RA (1994) *Science 266,* 28-30] *UZ*

Wie „naß" ist die Erdkruste?

Verschiedene Minerale der Erdkruste haben in ihrer Kristallstruktur Wasser und andere flüchtige Verbindungen eingebaut. Auch der Porenraum zwischen den Mineralen kann Flüssigkeiten enthalten. Bislang hat man angenommen, daß bestimmte seismische Befunde und die elektrische Leitfähigkeit der tieferen Kruste auf die Anwesenheit von Flüssigkeiten zurückgehen. Obwohl die Ergebnisse von Tiefbohrungen dieser Deutung teilweise widersprechen – z.B. bewirken dünne Graphitlagen die hohen Leitfähigkeiten – wurden andererseits größere Flüssigkeitsmengen in der Tiefe entdeckt. Eigentlich ist zu erwarten, daß Wasser durch die feinen Risse im Gestein langsam nach oben entweicht und nicht über geologische Zeiträume in der Erdkruste verbleibt. Gibt es dennoch einen Mechanismus, der Wasser zurückhalten kann? BAILEY schlägt einen Kapillareffekt vor: Bei der Entmischung von CO_2 und H_2O verstopfen Gasblasen von CO_2 den Porenraum. Dadurch könnten selbst im größeren horizontalen Maßstab Flüssigkeiten in der Kruste gespeichert werden. Dieser Prozeß wäre in der Zone wirksam, in der das spröde Verhalten der Kruste aufgrund höherer Temperaturen und Drücke in ein elastisches Verhalten übergeht.
[YARDLEY BWD & VALLEY JW (1994) *Nature 371,* 205-206; BAILEY RC (1994) *Nature 371,* 238-240] *TF*

Leserpost an den Herausgeber

Leserbriefe an Studium Integrale *journal* sind erwünscht. Dabei spielt keine Rolle, ob sich der Inhalt auf Beiträge des Journals bezieht oder andere Themen aus dem Spektrum der Zeitschrift betrifft. Die Entscheidung über eine Publikation trifft das Redaktionsteam. Autoren, auf deren Beitrag eingegangen wurde, werden in der Regel zu einer Antwort eingeladen. Senden Sie Ihre Post an die Adresse des Herausgebers (s. Impressum).

Leserecho

Zu E. Bertsch, Genetische Algorithmen als Evolutionsprogramme? Studium Integrale Journal 1 (1994), S. 25-29

Als Ergänzung zu dem o.a. Beitrag möchte ich aus meinen Erkenntnissen zu diesem Thema folgendes mitteilen.

„Evolutionsprogramme" lassen sich ohne Zweifel für bestimmte numerische Optimierungsprobleme gut einsetzen. In der Dissertation FUCHS (1981,1983) ist ein solches Verfahren für einen Fließprozeß – die Versorgung mit elektrischer Energie – entwickelt worden. Es wurde als ein „Suchverfahren mit Zufallszahlen" bezeichnet, während SCHWEFEL (1977) in seinem mehrere Verfahren zusammenfassenden Buch von „Evolutionsstrategien" spricht.

Die Vorteile des von FUCHS entwickelten Verfahrens (ähnliches gibt es bei SCHWEFEL) waren:

1. Die Abhängigkeit der Zielfunktion von den einzelnen Steuervariablen muß nicht bekannt sein, sie kann also beliebig kompliziert sein.
2. Eine Änderung der Zielfunktion bringt nur wenig Aufwand für die Änderung des Programmes.

3. Begrenzungen und Nebenbedingungen können leicht eingebaut werden, ohne daß Konvergenzschwierigkeiten zu befürchten sind.
4. Der Optimalwert kann beliebig genau eingegrenzt werden.

Erkauft wird dies allerdings durch längere Rechenzeit wegen der erhöhten Anzahl von Suchschritten.

Für ein gutes Funktionieren müssen aber folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Eine eindeutige Zielfunktion muß berechnet werden können, mit der bei jedem Schritt entschieden werden kann, ob eine Verbesserung aufgetreten ist oder nicht.
2. Die Zwischenschritte müssen zulässige Lösungen ergeben, die mit den jeweils gleichen Bedingungen für die Zielfunktion bewertet werden können.
3. Für den Lösungsraum sollte Konvexität vorliegen, da mit der einfachen Strategie nur das nächste lokale Maximum gefunden wird.

Betrachtet man diese Ergebnisse im Hinblick auf die Evolution, dann sehe ich folgende Probleme:

1. Die Selektion für die Zielfunktion „der Tüchtigste" entscheidet nicht scharf genug, damit tatsächlich nur eine Höherentwicklung auftritt (jeder weniger Tüchtige müßte von der Fortpflanzung ausgeschlossen werden!).
2. Jeder einzelne Evolutions-Schritt müßte zu einer Verbesserung der „Tüchtigkeit" führen.
3. Es wird zwar eine optimale Lösung gefunden, bei der die durch die Steuervariablen gegebenen Möglichkeiten optimal ausgenutzt werden, aber etwas Neuartiges entsteht dabei nicht! Die Struktur des Lösungsraumes ist vorhanden und es wird nur darin die optimale Lösung bestimmt.

Aus dieser Betrachtung ergibt sich, daß ein „Evolutionsprogramm" zwar für gewisse Optimierungsaufgaben verwendet werden kann, aber nicht das Grundgesetz der Evolution in der Natur sein kann. Die geforderte Codierung eines Programmes kann damit nicht erzeugt werden und damit auch nicht der genetische Code des Lebens.

MICHALEWICZ und andere haben diese Verfahren zwar gegenüber dem einfachen Verfahren von FUCHS weiterentwickelt. Die Frage der Wirksamkeit für die Evolution wird dadurch aber weniger durchschaubar, meines Erachtens kann eine brauchbare Codierung damit auch nicht erzeugt werden.

Literatur

FUCHS F (1981) Optimierung des Lastflusses in einem elektrischen Energienetz mittels eines Suchverfahrens mit Zufallszahlen. Diss. Univ. Stuttgart.

FUCHS F, MAIER HA (1983) Optimierung des Lastflusses in elektrischen Energieversorgungsnetzen mittels Zufallszahlen. Archiv für Elektrotechnik *66*, 75-83 und 85-94.

SCHWEFEL HP (1977) Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie. Basel, Stuttgart.

Heinz Maier, Ostfildern

REZENSIONEN

Peter Rothe: Gesteine. Entstehung – Zerstörung – Umbildung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1994 (162 S.)

Bei diesem Werk handelt es sich weder um ein Bestimmungsbuch für Gesteine noch um ein einschlägiges petrographisches Lehrbuch. Vielmehr hat es sich der Autor zur Aufgabe gemacht, die Genese der Gesteine und ihre weitere Entwicklung in einer faßlichen und dem Studienanfänger angemessenen Weise zu beschreiben. Besonders in den einführenden Bestimmungskursen der geowissenschaftlichen Fachdisziplinen steht diese Thematik etwas hintenan: Die Studenten sind so sehr mit dem Erlernen ungewohnter Mineral- und Gesteinsnamen, ihren Eigenschaften und chemischen Formeln beschäftigt, daß die tiefschürfenden Verständnisfragen *Wie* und *Warum* oftmals unterbleiben. Gerade hier beginnt jedoch die Natur-Erforschung, aus einzelnen Daten werden Zusammenhänge, ungelöste Fragen entwickeln sich zu Forschungsprojekten.

„Erkenntnis" lautet die Antwort des Autors auf die neugierige Frage von Sammlern, was die Exkursionsteilnehmer denn im Steinbruch suchten. Dieser Anekdote im Vorwort folgt gleich noch ein DARWIN-Zitat zur theoriegeleiteten Beobachtung. Daß damit aber nicht willkürliches Drauflosspekulieren ge-meint ist, wird dem Leser in den folgenden Kapiteln deutlich: Über die Experimentelle Petrologie hat die physikalisch-chemisch orientierte Sichtweise Eingang in die Geowissenschaften gefunden. Die sog. exakten Naturwissenschaften füllen mit

schwierigen Experimenten und Modellen die Lücke, wenn es um die Entstehungsgeschichte der Gesteine geht. Davon sieht man in den einzelnen Kapiteln außer einigen Mineralformeln und graphischen Darstellungen wenig – was den einführenden Charakter des Buches unterstreicht. Doch man spürt etwas von der analytischen, sauber darstellenden und kritisch abwägenden Arbeitsweise, mit der die Gesteinswelt erforscht und ihr Werdegang rekonstruiert wird.

Gesteinsbildung ist nicht eine Frage der Zeit, sondern der geologischen Bedingungen.

Gesteinsbildung ist nicht eine Frage der Zeit, sondern der geologischen Bedingungen. Diesem Aspekt widmet der Autor leider nur drei Seiten, doch wird deutlich, daß er ihm mit all seinen Implikationen ein zentrales Anliegen ist. Einerseits vollziehen die Gesteine einen globalen Wandel: Vulkanische Gesteine nehmen relativ zu den Sedimentgesteinen mit der Zeit ab. Aus einem Mischgestein (Grauwacke) waschen physikalische und chemische Prozesse schließlich das widerstandsfähigste Mineral (Quarz, Quarzsand) heraus. Aber Reife zeugt längst nicht immer von Alter – und umgekehrt. Die tertiären Pechkohlen in der Molasse des Voralpenlandes entsprechen in ihrem Inkohlungsstadium etwa der Steinkohle, wie sie aus dem Karbon bekannt ist – Folge einer intensiven Beanspruchung und Erwärmung. Kalkschlamm aus der Tiefsee, nach geologischer Datierung ca. 150 Millionen Jahre alt, ist wenig verfestigt. Dagegen können die sog. „beach rocks" (verfestigte Karbonatgesteine) ausgesprochen junge Bildungen sein, man hat in ihnen schon Coca-Cola-Flaschen gefunden.

Auch wenn die Fülle des spezifischen und unvermeidlichen Fachvokabulars den interessierten Laien eher abschrecken wird, sind doch viele Abschnitte eingeschaltet, die an bekannte Begriffe anknüpfen. Hierzu zählen die Exkurse über die Entstehung von Achaten und Feuersteinen, Erklärungen über den Ursprung von Gesteins- und Mineralnamen, Hinweise auf Vorkommen in Europa und den praktischen Nutzen einiger Gesteine. Daß sich viele Deutungen mit der Zeit gewandelt haben, wird am Beispiel der Kontroverse über die Entstehung der Granite erläutert. Am ausführlichsten werden die Sedimente und Sedimentgesteine behandelt, u.a. Karbonate, Sandsteine, Kohlen und Evaporite. Hervorzuheben sind die ordentliche Präsentation der Materie und der gute Sprachstil; das ausführliche Register ermöglicht die Nutzung des Buches als Nachschlagewerk. Wenn es in einigen Kapiteln doch zu trocken und lehrbuchhaft wird, so trägt die ungeheure Vielfalt der in der Natur anzutreffenden Substanzen die Schuld: Ein paar Dutzend chemischer Elemente formen Tausende von Mineralen, wenige Minerale bilden, abhängig von den äußeren Bedingungen, in unterschiedlichen Anteilen und Kombinationen eine Fülle von Gesteinen aus. So muß letztlich doch systematisiert und klassifiziert werden.

Thomas Fritzsche

Michael Brandt

Gehirn und Sprache

Fossile Zeugnisse zum Ursprung des Menschen

Pascal-Verlag Berlin, 1992. 93 S.; 35 Abb.; 10 Tab. Format 16,5 x 24;

ISBN 3-927390-08-9, Bestell-Nr.: 899.808, DM 18,– / sfr 18,40

Australopithecus, Homo habilis und *Homo erectus* werden als die wichtigsten Zwischenstufen in der Entwicklung zum modernen Menschen betrachtet. Die Zusammenschau der vorliegenden Ergebnisse zeigt, daß entgegen der verbreiteten Sichtweise der Evolution des Menschen als kontinuierlichem Entwicklungsprozeß die vorliegenden Daten eher ein diskontinuierliches Bild ergeben. Unumstrittene Übergangsglieder, die eine allmähliche Umwandlung eines menschenaffenähnlichen Gehirns in ein menschliches Gehirn belegen, wurden bisher nicht beschrieben.

Aus dem Inhalt:
Teil 1: Schädelinnenausgüsse fossiler Hominiden – Endocranialausgüsse – Zeugnisse vergangener Lebensformen – Schädelinnenausgußanalyse: Gehirnvolumen, Gehirnstruktur – Diskussion von Hirnsulcusmustern einiger fossiler Hominiden – Chancen und Grenzen der Paläneurologie für die Zuordnung fossiler Formen
Teil 2: Fossilien, Steinwerkzeuge und der Ursprung der menschlichen Sprache – Der Neandertaler als „connecting link" in der Sprachevolution? – Händigkeit, Hemisphärenlateralisation und Sprache – Kognitive Fähigkeiten und Werkzeugherstellung – Konnte die Hand von *Australopithecus* Werkzeuge herstellen?

Reinhard Junker

Rudimentäre Organe und Atavismen

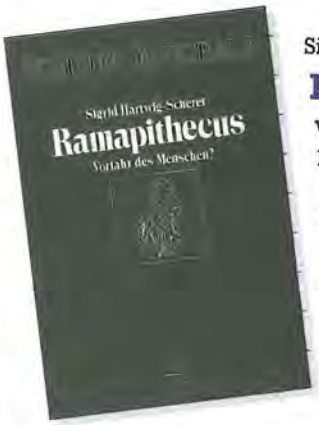
Konstruktionsfehler des Lebens?

Pascal-Verlag, 1989, 85 Seiten, 35 Abbildungen, Format 16,5 x 24; Bestell-Nr. 79.752, ISBN 3-927390-03-8, DM 18,– / sfr 18,40

Trägt der Mensch das Erbe tierischer Vorfahren in sich? Rudimentäre Organe und Atavismen bilden als „Evolutionsbeweise" einen Schwerpunkt im evolutionär orientierten Biologieunterricht. Dies ist insofern bemerkenswert, als die einschlägige Primärliteratur die entsprechende Grundlagenforschung nicht widerspiegelt.

Die Arbeit bietet dem interessierten Spezialisten und dem gebildeten Laien den Zugang zu einer weit verstreuten und oft schwer zugänglichen Fachliteratur. Angesichts der Tatsache, daß die letzte große Monographie über rudimentäre Organe dreißig Jahre alt ist, wird mit dieser Publikation ein den Stand der Wissenschaft wiedergebender Einstieg in die Thematik ermöglicht.

Aus dem Inhalt:
Was sind „rudimentäre Organe"? (Kriteriendiskussion) - Rudimentäre Organe im Kontext der Evolutionslehre – Kritische Diskssion zur „Biogenetischen Grundregel" – Deutung von Atavismen – Sach-, Autoren- und Artnamenregister



Sigrid Hartwig-Scherer

Ramapithecus

Vorfahr des Menschen?

Pascal-Verlag Berlin, 1989, 63 Seiten, 20 Abbildungen, 8 Tabellen, Format 16,5 x 24; Bestell-Nr. 79.751, ISBN 3-927390-00-3, DM 18,– / sfr 18,40

Die Arbeit zeichnet unter umfassender Berücksichtigung auch der neuesten Literatur die bisweilen verschlungenen Pfade nach, auf denen sich die Meinungen der Paläanthropologen bezüglich *Ramapithecus* und verwandter fossiler Formen in den letzten fünf Jahrzehnten bewegten: Ein faszinierendes Kapitel paläanthropologischer Forschung wird vor dem Leser ausgebreitet.

Ramapithecus, einst erster Hominide und damit früher Vorfahr des Menschen, entpuppt sich heute eher als Verwandter des asiatischen Menschenaffen Orang-Utan. Die Faktoren, welche für einen derart gravierenden Deutungswandel verantwortlich sein könnten, sind nicht nur für den Anthropologen interessant, illustrieren sie doch die grundsätzliche Abhängigkeit aller Fossildeutungen von den jeweils aktuellen evolutionstheoretischen Rahmenvorstellungen.

Aus dem Inhalt:
Geschichtlicher Überblick – Kritische Anfragen an verschiedene Rekonstruktionsversuche – Probleme der Merkmalswertung und Klassifikation – Einflüsse der Molekularbiologie – Neufunde aus der Türkei und Pakistan – Mögliche Verwandtschaft zum Orang Utan – Die chinesischen Fossilien aus Lufeng – Anhang mit Kurzbeschreibung der wichtigsten Funde und ausführlichem Glossar

Erhältlich im Buchhandel oder bei
SG Wort & Wissen • Sommerhalde 10 • 72270 Baiersbronn
Telefon (0 74 42) 44 72 • Fax 5 05 23